

**OPTIMIZACIÓN DE LA PROGRAMACIÓN DE AUTOBUSES EN RUTAS
ALIMENTADORAS DEL SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO MEGABUS**

ANDRÉS LÓPEZ BONILLA

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
MAESTRÍA EN INVESTIGACIÓN OPERATIVA Y ESTADÍSTICA
PEREIRA
2016**

**OPTIMIZACIÓN DE LA PROGRAMACIÓN DE AUTOBUSES EN RUTAS
ALIMENTADORAS DEL SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO MEGABUS**

ANDRÉS LÓPEZ BONILLA

**Proyecto presentado como requisito parcial para optar al título de
MAGISTER EN INVESTIGACIÓN OPERATIVA Y ESTADÍSTICA**

**DIRECTOR Y COAUTOR
Ph.D. JOSE ADALBERTO SOTO MEJÍA**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
MAESTRÍA EN INVESTIGACIÓN OPERATIVA Y ESTADÍSTICA
PEREIRA
2016**

NOTA DE ACEPTACIÓN

JURADO

JURADO

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a familiares, docentes y amigos que han acompañado y animado en el camino hacia este objetivo, gran parte de este logro les pertenece.

Agradecemos a la Universidad Tecnológica de Pereira y a Colciencias 1110-622 38514, por el apoyo económico y académico brindado a este trabajo de grado de maestría.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	11
INTRODUCCIÓN	13
1 PLANEACIÓN DE OPERACIÓN DEL TRANSPORTE PÚBLICO.....	15
1.1 NETWORK ROUTE DESIGN.....	16
1.2 TIME TABLE.....	16
1.2.1 Definición de la frecuencia respecto al perfil de carga.....	18
1.2.2 Programación de servicios basada en intervalos de paso iguales	19
1.2.3 Programación de servicios basada en autobuses con carga igual.....	20
1.2.4 Definición del tiempo de viaje.....	21
1.3 VEHICLE SCHEDULING.....	23
1.3.1 Asignación de flota a una sola ruta	24
1.3.2 Asignación de flota a múltiples rutas.....	27
1.4 CREW SCHEDULING.....	34
2 REVISIÓN DE ESTADO DEL ARTE	36
2.1 OPTIMAL MULTI-VEHICLE TYPE TRANSIT TIMETABLING AND VEHICLE SCHEDULING	36
2.2 A COMPARISON OF DIFFERENT SOLUTION APPROACHES TO THE VEHICLE SCHEDULING PROBLEM IN A PRACTICAL CASE	42
2.3 A STOCHASTIC PROGRAMMING APPROACH FOR ROBUST VEHICLE SCHEDULING IN PUBLIC BUS TRANSPORT	53
2.4 PUBLIC-TRANSPORT VEHICLE SCHEDULING WITH MULTI VEHICLE TYPE	62
2.5 AN INTEGRATED APPROACH FOR TIMETABLING AND VEHICLE SCHEDULING PROBLEMS TO ANALYZE THE TRADE-OFF BETWEEN LEVEL OF SERVICE AND OPERATING COSTS OF TRANSIT NETWORKS	72
2.6 A VEHICLE SCHEDULING PROBLEM WITH FIXED TRIPS AND TIME LIMITATIONS.....	88
2.7 ITERATED LOCAL SEARCH FOR THE MULTIPLE DEPOT VEHICLE SCHEDULING PROBLEM.....	93
2.8 TRANSIT NETWORK TIMETABLING AND VEHICLE ASSIGNMENT FOR REGULATING AUTHORITIES	100
3 FORMULACIÓN GENERAL DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	103
4 OBJETIVOS DEL TRABAJO	106
4.1 OBJETIVO GENERAL	106

4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	106
5	<i>DESCRIPCIÓN DEL SITM MEGABÚS</i>	107
6	<i>PLANTEAMIENTO DE LA PROGRAMACIÓN ACTUAL</i>	111
7	<i>PLANTEAMIENTO DE LA SOLUCIÓN</i>	119
7.1	TÉCNICA DE EMPAQUETAMIENTO	121
7.2	ALGORITMO GENÉTICO	123
8	<i>RESULTADOS</i>	125
8.1	COSTOS DE OPERACIÓN ACTUAL	125
8.2	COSTOS DE OPERACIÓN PROPUESTA	126
8.3	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	127
8.4	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	130
9	<i>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</i>	135
10	<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	136

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Descomposición de proceso de planeación de la operación de transporte público.....	15
Figura 2. Perfil de carga espacial y temporal	17
Figura 3. Determinación de despachos con intervalos de tiempo iguales	20
Figura 4. Determinación de despachos con autobuses con cargas iguales	21
Figura 5. Tiempos de viaje de una ruta a lo largo de una jornada de operación....	22
Figura 6. Determinación de flota necesaria para una sola ruta en dos terminales.	27
Figura 7. Programación de servicios asociada a la Función Déficit	31
Figura 8. Inserción de viajes en vacío para reducir la flota en operación.....	32
Figura 9. Desplazamiento de servicios en el tiempo para reducir la flota en operación	33
Figura 10. Ejemplo de selección de capacidad del autobús con las 3 estrategias.	38
Figura 11. Optimización de Vehicle Scheduling.....	39
Figura 12. Costo de un arco como función del tiempo de espera	46
Figura 13. Costos de penalizaciones en la red espacio – temporal	55
Figura 14. Tradeoff entre Costos Planeados y de Penalización	59
Figura 15. Soluciones con tiempos fijos entre servicios y valores de α diferentes.	60
Figura 16. Diagrama de Flujo del Algoritmo desarrollado – Parte A	69
Figura 17. Diagrama de Flujo del Algoritmo desarrollado – Parte B	70
Figura 18. Solución a los problemas de programación de servicios y autobuses ..	74
Figura 19. Líneas i y j y transferencia en el nodo b	76
Figura 20. Flexibilidad en las horas de despacho	76
Figura 21. Red de activación de la variable de decisión	79
Figura 22. Representación Geométrica del modelo ϵ -restringido en el caso de una curva de Pareto no convexa	81
Figura 23. Izquierda: Formulación del modelo bi-objetivo. Derecha: idea principal del método de solución ϵ -restringido.....	82
Figura 24. Frente de Pareto para instancias con menor flexibilidad en intervalos de paso	84
Figura 25. Frente de Pareto para instancias con flexibilidad en intervalos de paso entre 13,25 y 18,75	85
Figura 26. Frente de Pareto para instancias con mayor flexibilidad en intervalos de paso	85
Figura 27. Conjunto de incompatibilidad	90
Figura 28. Ejemplo de movimiento de bloque con correcciones	98
Figura 29. Rutas troncales y cuencas alimentadoras del sistema Megabús.....	107
Figura 30. Rutas Alimentadoras de la Cuenca Dosquebradas	108
Figura 31. Rutas Alimentadoras de la Cuenca Cuba	110
Figura 32. Programación de servicios con tiempo de ciclo múltiplo del intervalo de paso	113
Figura 33. Programación de servicios con tiempo de ciclo que no es múltiplo del intervalo de paso.....	114

Figura 34. Perfil de movilización de usuarios en una ruta alimentadora en Días Hábles	115
Figura 35. Ejemplo de programación de rutas (parte izquierda) y dos de las tablas resultantes (centro y derecha)	118
Figura 36. Representación de servicios con autobuses operando siempre en la misma.	122
Figura 37. Identificación de los servicios de las rutas del caso de ejemplo (vector solución).....	122
Figura 38. Ejemplo 1 de aplicación de la técnica de empaquetamiento	122
Figura 39. Ejemplo 2 de aplicación de la técnica de empaquetamiento	123
Figura 40. Representación gráfica de la programación de autobuses.	128
Figura 41. Evolución del AG para programación de autobuses en una de las pruebas con penalización \$ 500 por cambio de ruta.....	130
Figura 42. Sensibilidad del cambio de ruta en los diferentes escenarios de penalización.	132
Figura 43. Sensibilidad del tiempo inoficioso en los diferentes escenarios de penalización.	134
Figura 44. Sensibilidad del costo de la operación en los diferentes escenarios de penalización	134

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de cálculo de frecuencia y hedway con los métodos 1 y 2....	19
Tabla 2. Análisis del artículo: Optimal Multi-Vehicle Type Transit Timetabling and Vehicle Scheduling	40
Tabla 3. Resultados del modelo de asignación.....	46
Tabla 4. Valores de los parámetros de costo para la solución de la Tabla 3	47
Tabla 5. Cantidad de buses requeridos ajustando la relación $r=n_{bus}/dh_{fix}$	48
Tabla 6. Análisis de sensibilidad con diferentes valores de $negw$	48
Tabla 7. Análisis de sensibilidad con diferentes valores de costo por asignación de un tipo de autobús equivocado	49
Tabla 8. Resultados con el algoritmo de Programación Lógica	49
Tabla 9. Representación de la programación de buses para el Algoritmo Genético	50
Tabla 10. Número de vehículos con el Algoritmo Genético	51
Tabla 11. Resultados de Modelo de Asignación vs Programación Lógica.....	51
Tabla 12. Análisis del artículo: A comparison of different solution approaches to the vehicle scheduling problem in a practical case	52
Tabla 13 Comparación de Soluciones	60
Tabla 14. Análisis del artículo: A stochastic programming approach for robust vehicle scheduling in public bus transport.....	61
Tabla 15. Notación adicionada a la teoría de Función Déficit	64
Tabla 16. Análisis del artículo: Public – transport vehicle scheduling with multi vehicle type	71
Tabla 17. Tipos de instancias y valores de los parámetros.....	83
Tabla 18. Resultados usando el algoritmo propuesto	83
Tabla 19. Análisis del artículo: An integrated approach for timetabling and vehicle scheduling problems to analyze the trade-off between level of service and operating costs of transit networks.....	86
Tabla 20. Análisis del artículo: A vehicle scheduling problem with fixed trips and time limitations.	92
Tabla 21. Análisis del artículo: Iterated local search for the multiple depot vehicle scheduling problem.	99
Tabla 22. Análisis del artículo: Transit Network Timetabling And Vehicle Assignment For Regulating Authorities.....	101
Tabla 23. Costo de la operación actual.....	126
Tabla 24. Comparación costos por kilómetro programado entre programación de servicios actual vs propuesta	126
Tabla 25. Resultados obtenidos con una penalización de \$500,00 para cambio de ruta de un autobús	130
Tabla 26. Resultados obtenidos con una penalización de \$1000,00 para cambio de ruta de un autobús	131
Tabla 27. Resultados obtenidos con una penalización de \$2000,00 para cambio de ruta de un autobús	131

Tabla 28. Resultados obtenidos con una penalización de \$4000,00 para cambio de ruta de un autobús	131
--	-----

RESUMEN

La operación de un sistema de transporte público debe estar sustentada en un proceso de planeación constituido generalmente por cuatro etapas que son ejecutadas de forma secuencial, siendo considerado el producto de cada una como indiscutible insumo para el desarrollo de la siguiente. Las etapas son: i) el diseño de la red de rutas (*Network Route Design*), ii) la programación de los servicios para atender la demanda de usuarios (*Time Table*), iii) la programación de los autobuses para realizar los servicios definidos en la etapa anterior (*Vehicle Scheduling*) y iv) la programación de los conductores que cumplen con los itinerarios establecidos para los autobuses (*Crew Scheduling*).

La literatura relacionada, aborda el problema de programación de autobuses con un objetivo general común (minimizar costos de operación), usando diferentes técnicas y teniendo en cuenta las condiciones de operación de acuerdo al sistema sobre el cual se resuelve el problema. Es así como, para sistemas de transporte de distintas ciudades del mundo, se usan técnicas heurísticas, metaheurísticas y exactas para abordar el problema de *Vehicle Scheduling*, teniendo en cuenta distintas variables como el tamaño y capacidad de la flota, kilómetros recorridos por fuera de la operación, tiempos de inactividad de los autobuses, entre otras.

En el caso particular del Sistema Integrado de Transporte Masivo Megabus, se encuentran ineficiencias en el proceso de planeación de la operación, que resultan de los procesos de *Time Table* y *Vehicle Scheduling* y se ven representadas en mayores costos de operación y bajo aprovechamiento de la flota que ponen a disposición los concesionarios de operación. Esta situación es consecuencia de condiciones adoptadas para facilitar el desarrollo de ambas tareas en un único procedimiento y el control de la operación en estaciones e intercambiadores, pero que no permiten obtener resultados óptimos para la operación.

En este trabajo de grado se revisó y analizó literatura relacionada con el problema de *Vehicle Scheduling* y se desarrolló un modelo de solución de acuerdo a las condiciones de operación de las rutas alimentadoras del sistema Megabus, buscando minimizar los costos operacionales y usando una formulación similar a la de un problema de empaquetamiento en una dimensión. Fueron considerados los costos asociados al uso de los autobuses, los tiempos de inactividad entre servicios y los cambios de ruta para un mismo vehículo. Como técnica de solución se utiliza el algoritmo genético (AG) modificado, propuesto por (*Chu and Beasley, 1997*).

Los resultados obtenidos al suprimir condiciones actuales que generan ineficiencias y aplicando la solución propuesta en este trabajo de grado, logran reducir los costos operacionales totales. Sin embargo, es necesario generar procesos de optimización independientes para la etapa de *Time Table*, buscando

así la reducción del costo operacional y los tiempos de espera de los usuarios, lo que no hace parte del alcance de este trabajo de grado.

Palabras clave: *Vehicle Scheduling, Time table, Headway, Tiempo de Ciclo, Técnicas Metaheurísticas, Ruta Alimentadora, Sistema Megabus, Concesionarios de Operación.*

INTRODUCCIÓN

La programación o asignación del itinerario de los autobuses (*Vehicle Scheduling*) es una de las cuatro etapas de planeación de la operación de un sistema de transporte público, que parte de los servicios programados para un grupo de rutas y cuyo resultado es la programación de los autobuses que los ejecutan. Estos grupos de servicios asignados a cada autobús se conocerán en adelante como *tablas*, siendo que cada una de ellas se constituye de un grupo de servicios, consecutivos o no, que satisfacen la restricción de no superponerse entre sí, es decir, la hora de inicio de un servicio debe ser igual o posterior a la hora de finalización del anterior.

La generación óptima de las tablas resulta de encontrar la combinación de servicios asignados a cada autobús, de tal forma que se minimicen los costos operacionales al actuar sobre las variables como el tamaño de la flota y el tiempo inoficioso entre la finalización de un servicio y el inicio del siguiente. Además, debido a la variabilidad del comportamiento de la demanda se debe considerar que los servicios programados son muchos más en horas pico que en las valle, lo que genera que la flota necesaria en operación sea distinta en cada periodo del día.

Actualmente en el sistema Megabus, las actividades de *Time Table* y *Vehicle Scheduling* son desarrolladas en un único procedimiento, en el que la definición del intervalo de paso (*Headway*) y la flota necesaria no sólo depende de la demanda de usuarios y los niveles mínimos de servicio de cada ruta, sino que también el tiempo de ciclo tiene un papel decisivo. Esta condición permite que las tablas, producto de estas etapas de planificación, incluyan servicios de una única ruta en los que la hora de finalización de uno es la hora de inicio del siguiente.

De esta forma, la actual planeación de la operación del sistema Megabus genera ineficiencias en los procesos de *Time Table* y *Vehicle Scheduling*, toda vez que para garantizar el servicio mínimo requerido se produce una sobreoferta ligada a la condición de tiempos de ciclo de cada ruta, llevando a sobre costos en la operación y a un bajo aprovechamiento de la flota que dispone el sistema para la operación.

En la literatura relacionada con el problema de generar la programación de los autobuses para la operación de las rutas de un sistema de transporte, se encuentran propuestas que lo enfrentan con técnicas exactas, heurísticas y metaheurísticas, sin embargo, la magnitud del problema en la vida real ha hecho que se consideren parcialmente las variables y restricciones, resolviendo un problema relajado y de pequeñas dimensiones, pocas veces aplicable a cualquier sistema de transporte en operación, especialmente en Colombia, donde en

algunas ciudades se compra a un elevado costo software especializado que incluyen todas las herramientas necesarias para optimizar la operación, y en otras simplemente se trabaja con herramientas que no tienen alcance de optimización.

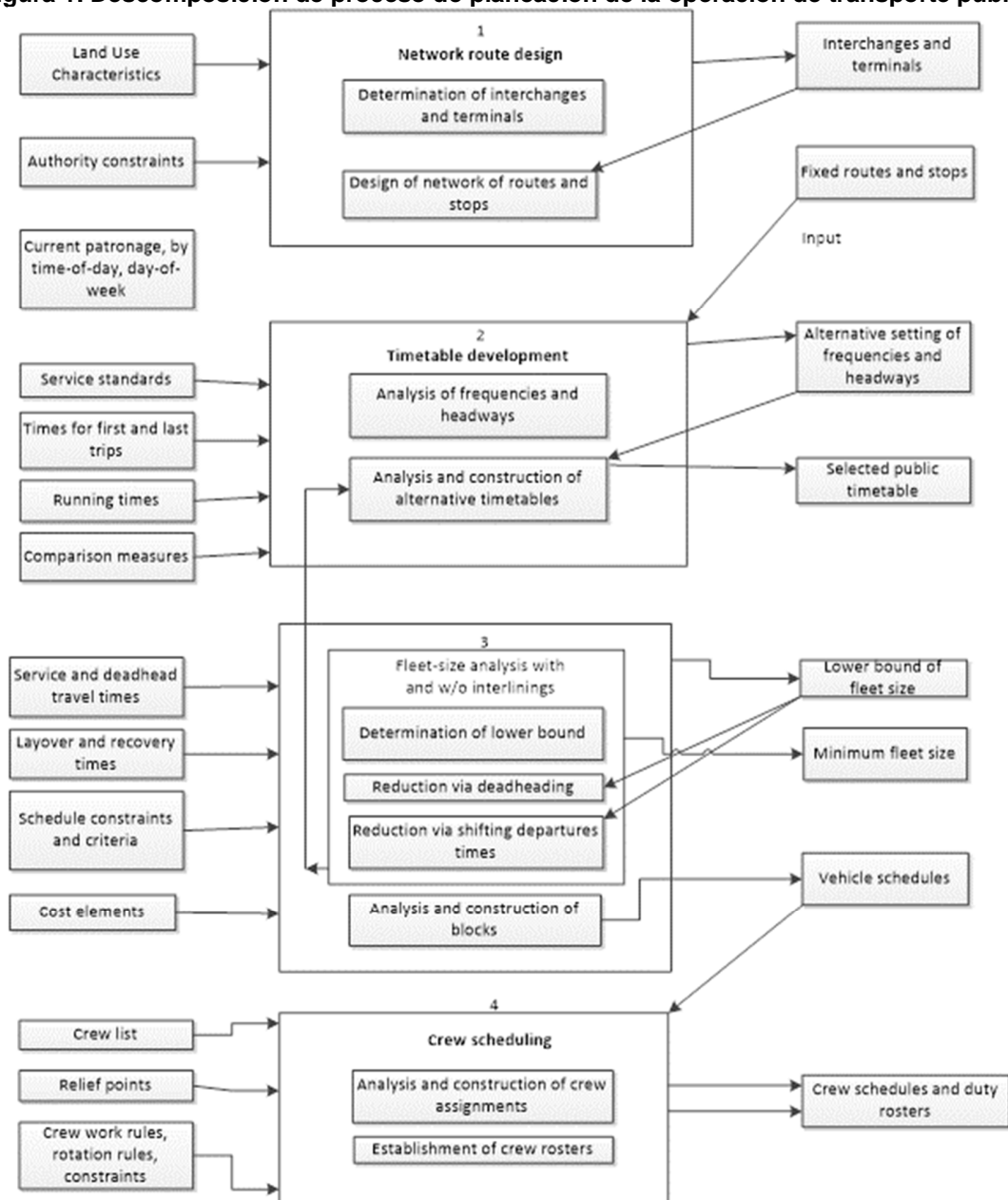
Por esta razón, y teniendo en cuenta que el sistema Megabus tiene condiciones propias para la operación de sus rutas alimentadoras, se propone una solución para el problema de *Vehicle Scheduling* para este subsistema, usando como técnica de solución un Algoritmo Genético, una formulación similar a la del problema de empaquetamiento en una dimensión y considerando todas las características de la operación y prestación de este servicio en el sistema local.

Este documento en los primeros capítulos expone sobre la planeación de la operación del transporte público y sus cuatro etapas, mostrando con mayor detalle lo correspondiente a la programación servicios y autobuses (*Time Table* y *Vehicle Scheduling*). Después continúa con una revisión de los trabajos realizados sobre la optimización del proceso de *Vehicle Scheduling* a nivel mundial, la formulación del problema, justificación y objetivos para el desarrollo del presente estudio. En los capítulos finales expone el planteamiento de la solución propuesta y analiza los resultados, sobre los cuales presenta las conclusiones y recomendaciones para estudios futuros.

1 PLANEACIÓN DE OPERACIÓN DEL TRANSPORTE PÚBLICO

El proceso de planeación de la operación de un sistema de transporte público generalmente considera cuatro etapas. En las dos primeras se busca garantizar a los usuarios la cobertura y nivel de servicio que necesita y en las últimas se define la forma en que los recursos de flota y conductores son dispuestos para ejecutar la operación.

Figura 1. Descomposición de proceso de planeación de la operación de transporte público



Fuente. Public transit and planning operation - Avishai Ceder

En la **Figura 1** se puede observar el proceso completo, relacionando en cada etapa los insumos requeridos para su desarrollo, como también sus resultados. Es importante resaltar que el producto o resultado de cada etapa de este proceso es la base para el desarrollo la siguiente, hasta obtener la definición completa de la red de rutas, los horarios de despacho, la asignación de flota y la programación de conductores (Ceder, 2007).

1.1 NETWORK ROUTE DESIGN

La primera etapa del proceso de planeación de la operación tiene como objetivo definir un diseño de red de rutas de transporte público que considere simultáneamente la perspectiva del pasajero, la empresa transportadora y la entidad gubernamental responsable. Siendo ésta la primera etapa y base de todo el proceso de planeación de operación, se busca que al definir los recorridos de las diferentes rutas y los sitios de parada de autobús, se alcancen objetivos como mayor aprovechamiento de la oferta de servicios, caminatas cortas a los paraderos y transitar por corredores de significativo volumen de usuarios.

Considerando que el diseño de la red de rutas puede involucrar infraestructura en su definición e impacta en gran medida en las costumbres de los usuarios, es un aspecto que generalmente permanece sin cambios durante largos periodos.

Para el desarrollo de este trabajo de grado se cuenta con el diseño de la red de rutas del Sistema Integrado de transporte Masivo (SITM) Megabus, específicamente del subsistema de rutas alimentadoras, que será descrito con mayor detalle más adelante.

1.2 TIME TABLE

La segunda etapa del proceso de planeación (*Time Table*) parte de un diseño de red de rutas ya definido, teniendo como objetivo establecer la programación de servicios (horario de despachos) con que va a ser atendida la demanda de usuarios de cada ruta, de ahí que la cantidad de servicios programados debe satisfacer como mínimo las necesidades de viaje de los usuarios, según los horarios en que deben realizar sus desplazamientos.

En el *Time Table* se debe conservar el equilibrio entre los costos de los usuarios y los de la empresa prestadora del servicio, puesto que los primeros esperan altas frecuencias que reduzcan sus tiempos de espera y le brinden mayor confort en el viaje, mientras que los segundos prefieren que con buses de gran capacidad y bajas frecuencias, se preste el servicio transportando a

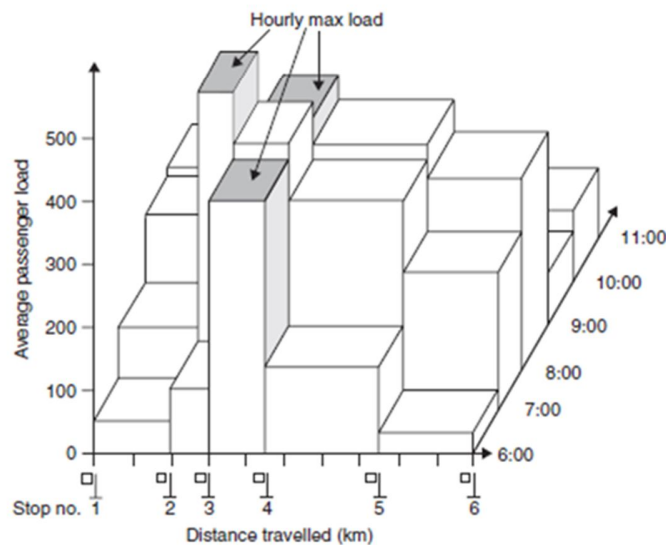
los usuarios en masa y recorriendo la menor cantidad de kilómetros posible. Esto hace necesario definir tiempos máximos para el intervalo de paso (*headway*), que son tenidos en cuenta en los momentos en que la demanda exige muy bajas frecuencias en la operación.

El cálculo de la frecuencia adecuada, requiere de analizar el comportamiento de la demanda de usuarios desde la parte temporal y espacial de la operación, puesto que, tal como se muestra en la **Figura 2**, la carga observada en una ruta tiene variaciones dependiendo del paradero o lugar en que se mida al igual que cambia en cada periodo de tiempo en que se tome la información. Por tanto, durante un día de operación se presentan periodos de altos picos en el flujo de usuarios (horas pico) y otros de muy baja movilización (horas valle), como también sucede que la movilización cambia su comportamiento de un tipo de día a otro (hábil, sábado, festivos), en fechas especiales (Semana Santa, Año Nuevo), por actividades de la ciudad (Día Sin Carro, Festividades), entre muchas otras causas.

Figura 2. Perfil de carga espacial y temporal

Stop no	Distance (km) to next stop	Average observed load (passengers), by hour					Total load (passengers)
		6:00–7:00	7:00–8:00	8:00–9:00	9:00–10:00	10:00–11:00	
1	2	50	136	245	250	95	776
2	1	100	(510)	310	208	122	1250
3	1.5	(400)	420	(400)	(320)	200	(1740)
4	3	135	335	350	166	(220)	1206
5	2.5	32	210	300	78	105	725

Notes: (1) Route length is 10 km, and stop no. 6 is the last stop
(2) For all hours, $d_o = 50$, $c = 90$ passenger, $F_m = 3$ veh/hr



Fuente. Public transit and planning operation - Avishai Ceder

Esta situación en particular, hace que los sistemas de transporte público necesiten de herramientas adecuadas para generar diferentes programaciones de servicios de forma rápida, teniendo en cuenta las características de la demanda y de la operación que se requiera, garantizando además resultados eficientes que logren minimizar los costos de la operación en todos los casos mencionados.

1.2.1 Definición de la frecuencia respecto al perfil de carga

El cálculo de la frecuencia de una ruta de acuerdo a su carga en un periodo de tiempo determinado, se resuelve con la siguiente ecuación:

$$F_j = \frac{\bar{P}_{mj}}{\gamma_j \cdot c} \quad (1)$$

Dónde:

j es el periodo a evaluar, generalmente 1 hora
 F_j es la frecuencia requerida en el periodo j
 \bar{P}_{mj} es el promedio del máximo de número pasajeros a bordo en el periodo j
 c es la capacidad de los autobuses
 γ_j es el factor de carga en el periodo j , $0 \leq \gamma_j \leq 1$

Debido al comportamiento del perfil de carga de una ruta, es posible emplear diferentes métodos para calcular la frecuencia requerida. A continuación se mostrarán dos de ellos que se diferencian por tomar el valor de mayor carga en puntos de la ruta diferentes.

El primer método considera para el cálculo de la frecuencia, la demanda de usuarios en el punto de mayor movilización diaria, es decir, teniendo los valores de demanda de cada paradero y periodo de tiempo (se toma como ejemplo la información de la **Figura 2**), se considera para todos los periodos la demanda observada en el punto de mayor movilización durante el día (paradero 3 en el ejemplo).

El segundo método considera para el cálculo de la frecuencia requerida, la demanda de usuarios en el punto de mayor movilización durante cada periodo, es decir, teniendo los valores de demanda de cada paradero y periodo de tiempo, se considera para cada periodo la demanda observada en el punto de mayor movilización durante el periodo evaluado (paradero 3 de 6:00 – 7:00, 8:00 – 9:00 y 9:00 – 10:00; paradero 2 de 7:00 – 8:00; paradero 4 de 10:00 – 11:00).

Para los dos métodos presentados, al igual que para otros que puedan ser implementados, tomar en consideración únicamente el perfil de carga puede llevar a tiempos de espera exagerados para los usuarios durante periodos de muy baja movilización, siendo necesario definir un límite de frecuencia mínima (*es igual a intervalo de paso máximo*) que garantice mantener el nivel de servicios en estándares aceptables para los usuarios.

Tabla 1. Resultados de cálculo de frecuencia y headway con los métodos 1 y 2

Period j	Method 1 (Daily max load point)		Method 2 (Hourly max load point)	
	F _{1j} (veh/hr)	H _{1j} (minutes)	F _{2j} (veh/hr)	H _{2j} (minutes)
6:00–7:00	8.0	7.5	8.0	7.5
7:00–8:00	8.4	7	10.2	6
8:00–9:00	8.0	7.5	8.0	7.5
9:00–10:00	6.4	9	6.4	9
10:00–11:00	4.0	15	4.4	14

Fuente. Public transit and planning operation - Avishai Ceder

En la **Tabla 1** se observan los resultados obtenidos con cada método para el perfil de carga de la **Figura 2**.

1.2.2 Programación de servicios basada en intervalos de paso iguales

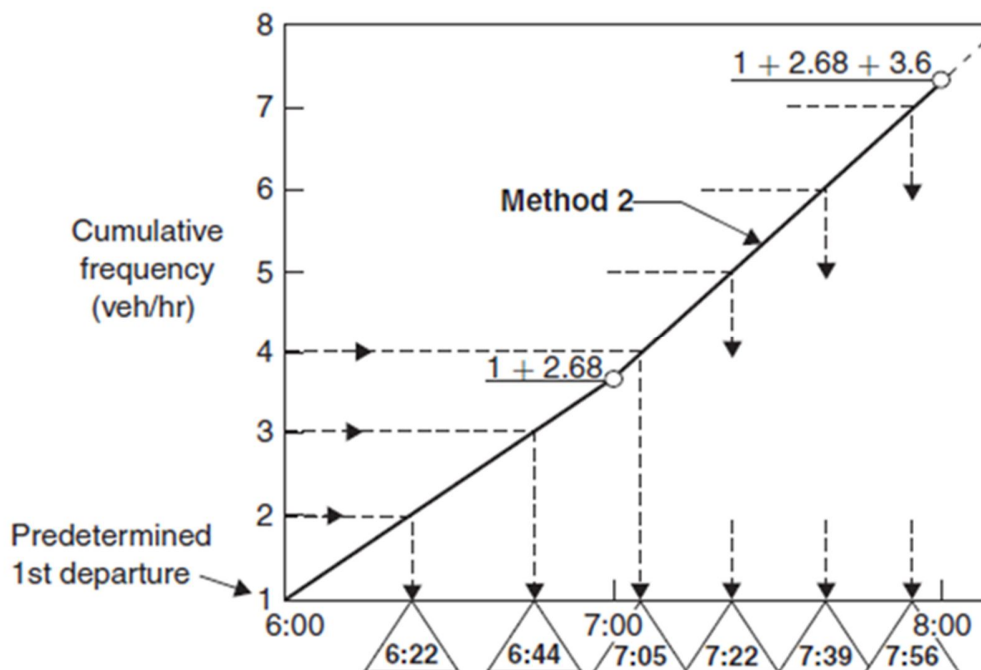
Generar la programación de una ruta, significa establecer las horas de partida de cada servicio desde uno o varios paraderos de la ruta (*puede presentarse que se incluyan horas de partida de paraderos intermedios*). Como resultado se obtiene una serie de servicios a lo largo de una jornada de operación, que definen como mínimo, las horas y lugares de inicio y fin de cada servicio.

Generar *Time Table* con intervalos de paso iguales, significa definir para cada periodo (*generalmente 1 hora*) la frecuencia adecuada y establecer la hora de partida de cada servicio con igual espaciamiento temporal entre ellos, garantizando la cantidad de servicios requeridos.

Si se considera la llegada de usuarios como una función lineal para cada periodo de tiempo, y se consolida una función de demanda acumulada de todos los periodos (*ver Figura 3*), es posible observar las horas de partida de cada servicio definidas con este método, que para el ejemplo tienen

intervalos de paso de 22 minutos en el periodo de 6:00 – 7:00 y de 17 minutos para el periodo de 7:00 – 8:00.

Figura 3. Determinación de despachos con intervalos de tiempo iguales



Fuente. Public transit and planning operation - Avishai Ceder

1.2.3 Programación de servicios basada en autobuses con carga igual

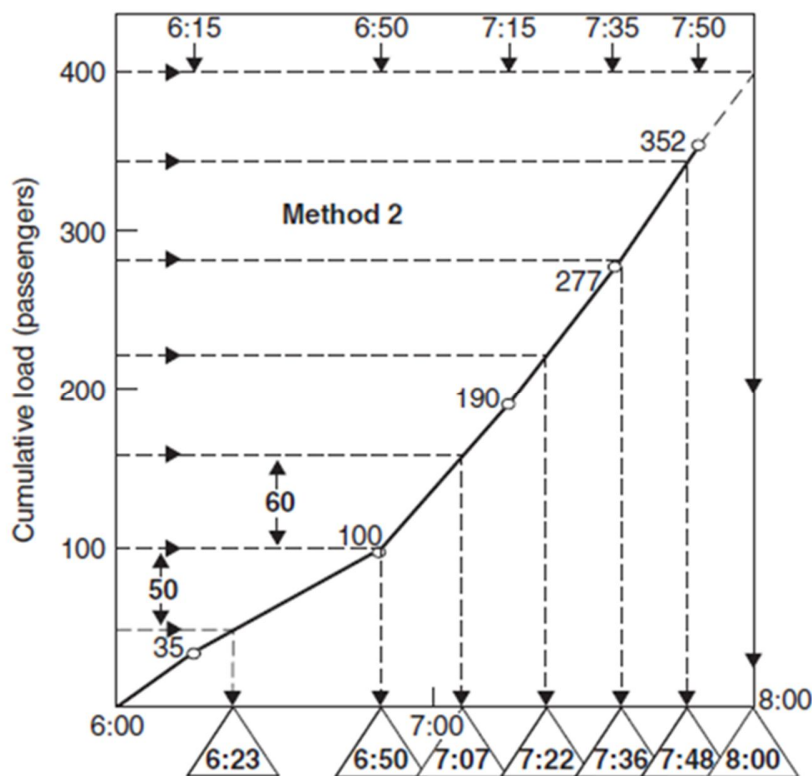
Como ya ha sido expuesto, la demanda de usuarios (cantidad de usuarios que requieren del servicio en un momento determinado) puede variar de un momento a otro, incluso en periodos de tiempo muy cortos, haciendo que la programación de servicios basada en intervalo de paso iguales genere un desbalance en la ocupación de los autobuses en operación, es decir, no todos los vehículos transportarán la misma cantidad de usuarios.

En la **Figura 4** se observa una función de demanda acumulada entre las 6:00 y 8:00, en este caso se tiene información de variación de demanda en periodos de tiempo muy cortos. Los puntos correspondientes a las 6:15, 6:50, 7:15, 7:35 y 7:50 representan vértices en los que cambia la pendiente de la función (*usuarios / minuto*).

Si se define la ocupación deseada en 50 *pasajeros / bus* para el periodo de 6:00 – 7:00 y en 60 *pasajeros / bus* para el periodo de 7:00 – 8:00, los servicios programados, que también pueden observarse en la **Figura 4**,

garantizan la ocupación deseada en cada autobús durante cada periodo, a pesar de no estar programados con intervalos de paso iguales.

Figura 4. Determinación de despachos con autobuses con cargas iguales



Fuente. Public transit and planning operation - Avishai Ceder

Cuando la programación de servicios consigue que todos los autobuses transporten una cantidad de usuarios igual, se tienen ventajas para usuarios y conductores, puesto que se logra equilibrar el confort para los primeros y mantener la velocidad operacional de la ruta en niveles adecuados para los segundos. Un autobús con más carga tendrá una velocidad operacional más baja, por consiguiente un mayor esfuerzo del operador en caso de que deba cumplir la misma ruta y el mismo tiempo de ciclo programado que otro operador en un autobús con menor carga. Sin embargo, la alta variabilidad de la demanda de usuarios en cada periodo de análisis hace complejo desarrollar la programación de los servicios con esta consideración.

1.2.4 Definición del tiempo de viaje

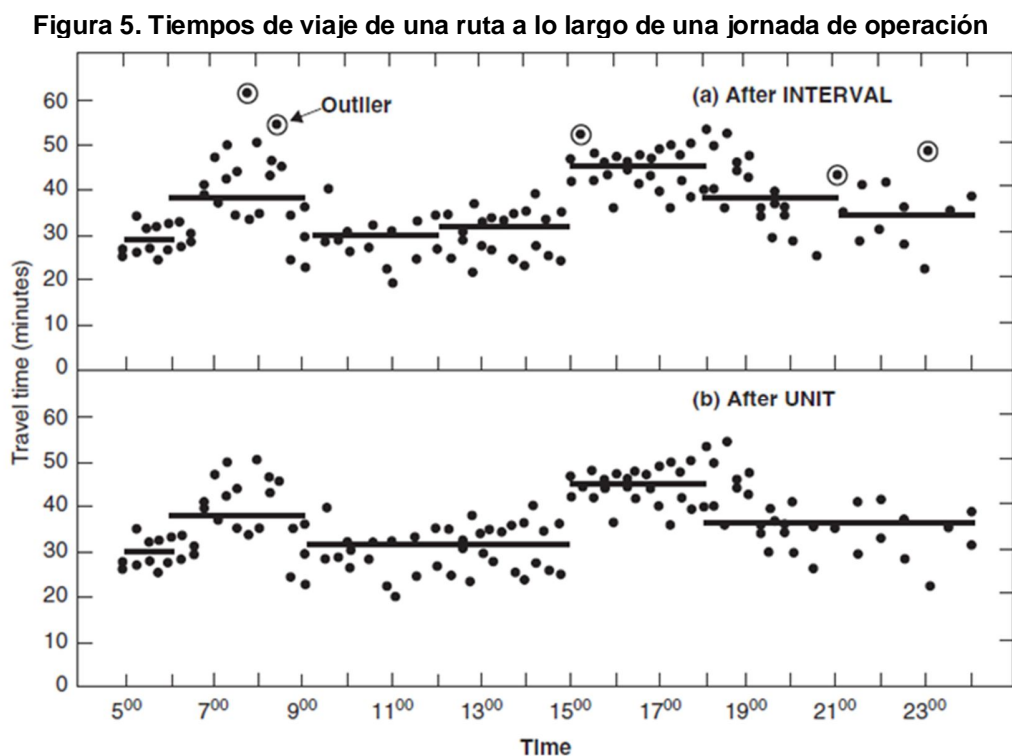
El tiempo de viaje que será tratado ahora, se refiere al tiempo que toma realizar el recorrido de un trayecto de una ruta desde su despacho en el

lugar de inicio hasta que termina en el lugar donde debe finalizar, que puede ser o no el mismo paradero de salida.

Este ítem debe ser muy bien definido para cada periodo del día, puesto que tiene variación a lo largo del día de acuerdo al tráfico, semáforos, accidentes, carga del autobús, rapidez de ascenso y descenso de los usuarios, entre otros factores. Su importancia radica en que tiene un alto impacto en la asignación de itinerarios a los autobuses (*siguiente etapa del proceso de planeación*), puesto que determina la hora de finalización de cada servicio y el momento en que un autobús queda disponible para ser asignado nuevamente a la operación.

Para la estimación del valor adecuado del tiempo de viaje, es necesario evaluar la información resultante de la operación de cada ruta durante una jornada completa.

A manera de ejemplo, en la parte superior de la **Figura 5** se observan datos de tiempos de viaje de una ruta durante una jornada de operación. La información es analizada inicialmente en periodos de 3 horas, luego se unen algunos que son consecutivos y con promedios de tiempo de viaje casi iguales. El resultado de este proceso se observa en la parte inferior de la **Figura 5**.



Fuente. Public transit and planning operation - Avishai Ceder

1.3 VEHICLE SCHEDULING

De las etapas anteriores se obtienen la red de rutas y la programación de los servicios que deben ser ejecutados en cada una de ellas, es decir, ya se tienen definidos la cobertura espacial y el nivel de servicio del sistema de transporte público. Sin embargo, en este punto del proceso de planeación aún no se ha definido la forma en que será implementada esta operación.

Inicialmente, en la tercera etapa del proceso de planeación de la operación (*Vehicle Scheduling*) se relacionarán los servicios ya programados con los autobuses que los deben realizar, y en la siguiente etapa se definirá la programación de los trabajadores que van a conducir los autobuses, cerrando así todo el proceso de planeación de la operación de un sistema de transporte público, desde el servicio a prestar hasta la asignación de los recursos necesarios para ejecutarlo.

La etapa de *Vehicle Scheduling* consiste en definir cómo una flota de autobuses cumplirá con la programación ya establecida, de tal forma que se ejecuten el 100% de los servicios programados, se satisfagan una serie de restricciones y se minimicen los costos operacionales. Generalmente, las principales variables a minimizar son la flota requerida para la ejecución y el tiempo inoficioso de los autobuses entre la finalización de un servicio y el inicio del siguiente.

En cuanto al planteamiento del problema, está muy arraigado a las condiciones que ofrezca el sistema de transporte público para la operación, es decir, si se cuenta con uno o más patios para el parqueo de autobuses, diferentes tipos de vehículos para un determinado servicio, si son permitidos o no los viajes por fuera de la operación entre un terminal y otro, el máximo tiempo inoficioso permitido, buscar máximo aprovechamiento de la operación en horas valle para labores de mantenimiento de autobuses, entre otras.

Por otra parte, según la literatura revisada, un sistema de transporte público para una población pequeña puede tener más de 2500 servicios distribuidos en 46 rutas y una flota de al menos 200 autobuses, lo que representa un alto grado de complejidad para la solución del problema. En el caso del sistema Megabus, siendo un sistema masivo de una ciudad intermedia, la implementación de rutas alimentadoras con llegada a tres terminales definidas en la primera etapa del proceso de planeación de la operación, lleva estos a valores de más de 3000 servicios en 30 rutas y una flota de aproximadamente 100 autobuses. La mayor concentración de servicios en las rutas se debe a que la frecuencia en el sistema Megabus es mayor que la propuesta en los sistemas estudiados en la literatura, y el menor requerimiento de flota es debido a que las rutas son mucho más cortas.

1.3.1 Asignación de flota a una sola ruta

Ya teniendo la programación de servicios de una ruta, se debe definir la flota mínima requerida para ejecutar todos los servicios planificados, y además, asignar a cada autobús el itinerario de los servicios que debe prestar. En la

Figura 6 se observa la programación de servicios de una ruta que se presta en ida y regreso entre dos terminales a y b , el tiempo de viaje de ambos trayectos es $T_{rja} = T_{rjb} = 15 \text{ minutos}$ y se cuenta con la información de los horarios de despacho desde cada terminal.

La flota mínima requerida para la operación de la ruta del ejemplo, se calcula con los valores de n_{ia} y n_{jb} (Primera y sexta columna), que representan para cada trayecto, la cuenta de los servicios que se programan desde el servicio i hasta uno antes del próximo que podría ejecutar el mismo autobús.

Para mayor claridad de la

Figura 6, se precisa que las flechas con línea continua representan el despacho de un autobús desde una terminal hacia el primer servicio que puede prestar ese mismo autobús en la otra terminal garantizando el cumplimiento del tiempo de viaje establecido para la ida. Las flechas con línea discontinua representan el despacho del servicio de regreso del mismo autobús hacia el primer servicio que pueda prestar en la estación inicial, cumpliendo también con el tiempo de viaje establecido para el regreso.

El valor de n_{ia} y n_{jb} se cuenta para cada terminal, desde el inicio de la flecha con línea continua hasta el servicio anterior al que apunta la flecha discontinua.

De este análisis se puede encontrar la flota mínima requerida para la operación de la ruta, se calcula con la siguiente ecuación:

$$N_{min}^r = \max\{\max_i n_{ia}, \max_j n_{jb}\} \quad (2)$$

La definición del itinerario de cada autobús se puede hacerse de varias formas, una de ellas está basada en la regla FIFO (*First In, First Out*) y permite asignar los servicios que se prestan desde cada terminal en el orden de llegada de cada autobús, teniendo siempre presente no programar más autobuses que los requeridos.

Figura 6. Determinación de flota necesaria para una sola ruta en dos terminales

Calculating n_{ia} $T_{rja} = 15$ minutes			Calculating n_{jb} $T_{rjb} = 15$ minutes		
n_{ia}	Timetable at a	Timetable at b	Timetable at a	Timetable at b	n_{jb}
3		5:00	6:00	5:00	3
2		5:30	6:15	5:30	2
3		6:00	6:30	6:00	1
3		6:30	6:45	6:30	2
4		6:50	7:00	6:50	5
4		7:05	7:10	7:05	5
3		7:10	7:20	7:10	4
2		7:15	7:25	7:15	4
2		7:20	7:40	7:20	3
—		7:30	8:00	7:30	3
	7:40		7:40	2	
	8:00		8:00	—	
$\max n_{ia}$	4				
$\max n_{jb}$			5		
N_{\min}^r	$\max (4, 5) = 5$				

Fuente. Public transit and planning operation - Avishai Ceder

1.3.2 Asignación de flota a múltiples rutas

Cada ruta de un sistema de transporte público cuenta con su programación de servicios, sin embargo, el total de los servicios programados para todas las rutas deben ser ejecutados por un grupo de autobuses, de tal forma que se satisfagan las restricciones que imponen las características de la operación.

Permitir que un autobús pueda ejecutar servicios de diferentes rutas es una de las condiciones que debe ser considerada en esta etapa de planeación, puesto que restringir el itinerario de un autobús a los servicios de una única ruta, genera mayores tiempos inoficiosos de los autobuses entre un servicio y otro, por consiguiente, también mayores requerimientos de flota.

Es importante precisar, que el actual proceso que se realiza en la planeación de la operación del sistema Megabús consigue generar la programación de servicios y el itinerario de los autobuses manteniendo cada vehículo en una única ruta y reduciendo a cero el tiempo inoficioso entre servicios. Sin embargo, esto se consigue condicionando la definición de la frecuencia y flota requerida al tiempo de ciclo de cada ruta, lo que genera sobrecostos por tener que programar más servicios de los necesarios y posiblemente incrementar la flota necesaria para la operación.

Según la literatura revisada, para llevar a cabo las tareas de *Vehicle Scheduling*, en algunos sistemas de transporte público de grandes dimensiones (*Algunos pueden llegar a tener aproximadamente 4000 autobuses, 2000 rutas y 50000 servicios programados diariamente*) serían requeridas hasta 60 personas dedicadas a esta labor, que generalmente usan de Diagramas de Gantt a través de un proceso de ensayo y error, buscando una buena solución del problema. Esto ha hecho que las empresas piensen en el desarrollo de sistemas computarizados para el desarrollo de esta actividad de forma mucho más rápida y con buenos resultados.

La dimensión y las condiciones particulares que impone cada sistema de transporte público, han hecho que los modelos propuestos para resolver este problema no consideren todas las variables y restricciones necesarias, y que además sus resultados no sean aplicables en cualquier ciudad. Esto hace deseable proponer una solución particular para el sistema Megabus, que por su definición de sistema masivo presenta características distintas a otros sistemas de transporte en cuanto a longitud de rutas, terminales, frecuencias y otras características que requieren ser consideradas de forma especial.

A continuación se presentan algunos métodos usados en el desarrollo de la programación de autobuses para varias rutas, con los cuales se calcula la flota mínima requerida y se busca minimizar la flota en operación.

1.3.2.1 Función Déficit

En los casos de programación de varias rutas, la flota mínima requerida en operación puede observarse haciendo uso de una función escalonada

denominada Función Déficit, que puede ser evaluada para cada terminal y la red completa.

La función está asociada a la programación de servicios y se incrementa en una unidad cuando un autobús es despachado de una terminal y decrece en una unidad cuando un autobús llega a ésta, tal como aparece en la

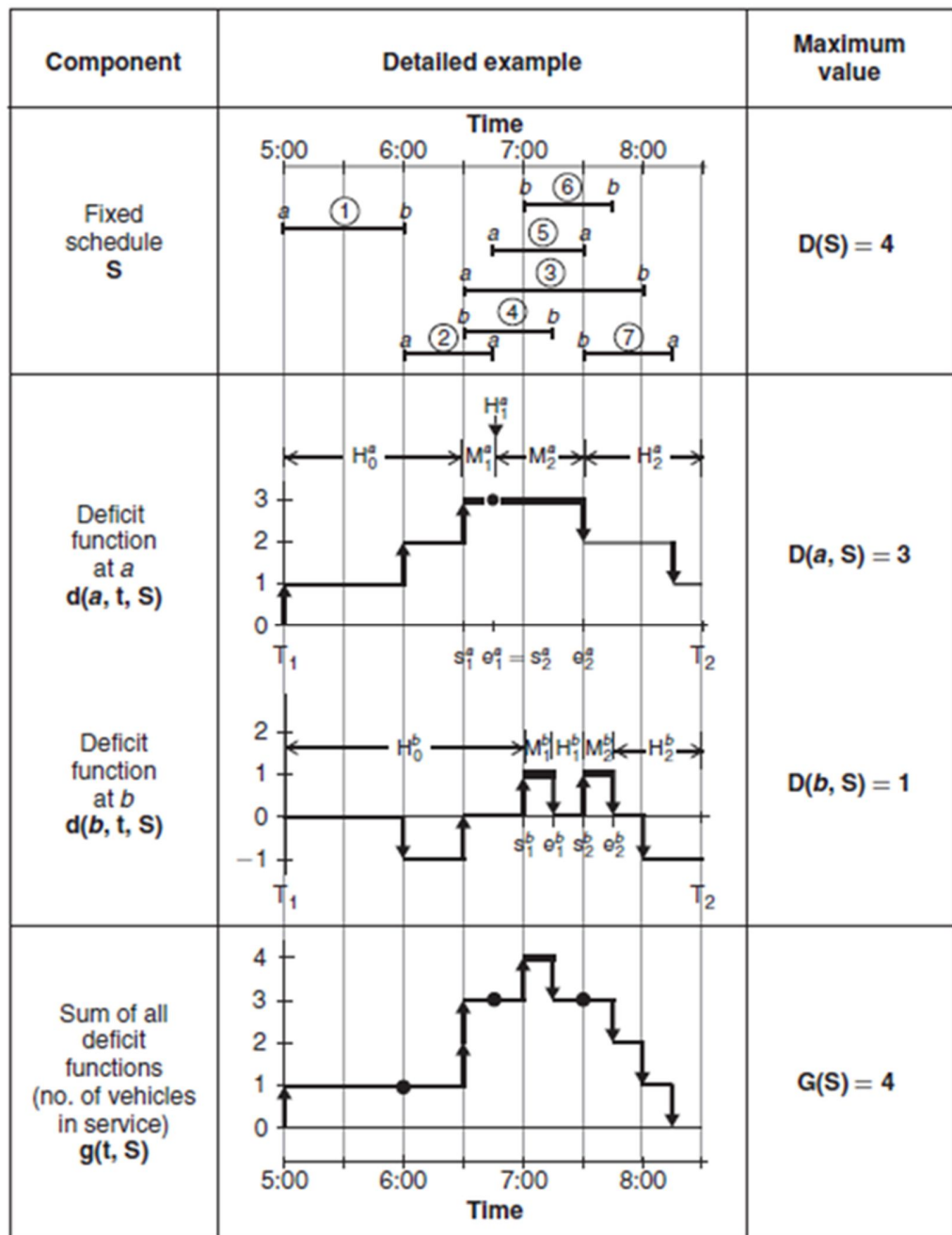
Figura 7, donde encontramos los siguientes términos:

- $d(k, t, S)$ es el valor de la Función Déficit del terminal k , en el tiempo t , para una programación de servicios S .
- $D(k, S)$ es el valor máximo de $d(k, t, S)$, en el periodo de tiempo $[T_1, T_2]$ que incluye el valor t .
- $g(t, S)$ es el valor de la suma de los valores de la Función Déficit de todos los terminales, en el tiempo t , para una programación de servicios S .
- $G(S)$ es el valor máximo de $g(k, t, S)$, en el periodo de tiempo $[T_1, T_2]$ que incluye el valor t .

Considerando lo anterior, la Función Déficit permite determinar la flota mínima requerida para la ejecución de toda la programación propuesta con la siguiente ecuación:

$$\text{Min } N = \sum_{k \in K} D(k) = \sum_{k \in K} \max_{t \in [T_1, T_2]} d(k, t) \quad (3)$$

Figura 7. Programación de servicios asociada a la Función Déficit



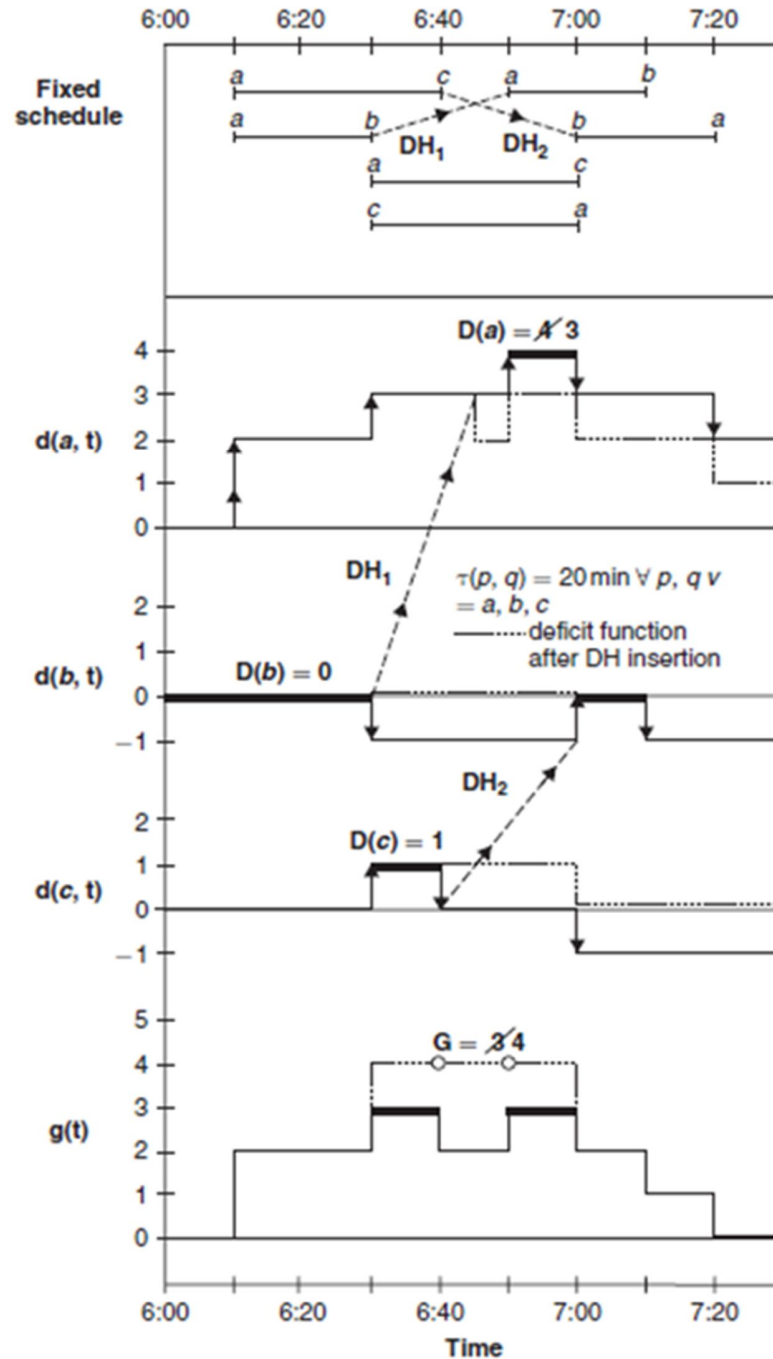
Fuente. Public transit and planning operation - Avishai Ceder

1.3.2.2 Inserción de viajes en vacío (Deadheading)

Este método consiste en adicionar viajes en vacío a una programación de servicios ya establecida. Estos viajes tienen el propósito de permitir que un

autobús que está inoficioso en una terminal, sea llevado a otra donde puede prestar un servicio y a la vez reducir la flota requerida para la operación de la red de rutas.

Figura 8. Inserción de viajes en vacío para reducir la flota en operación



Fuente. Public transit and planning operation - Avishai Ceder

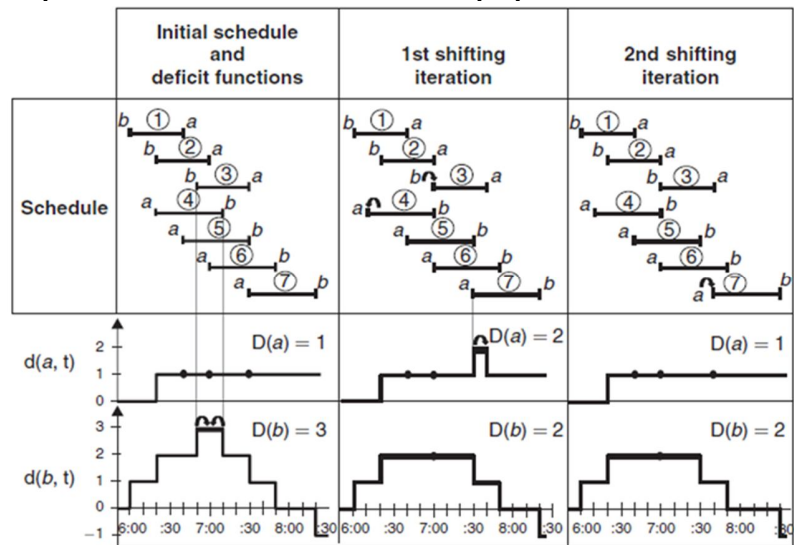
Para esto, es importante considerar el tiempo de viaje en vacío entre las dos terminales, que resulta menor que el tiempo de viaje en operación, puesto que el autobús que se traslada de una terminal a otra debe llegar a tiempo para iniciar sin retrasos su siguiente servicio. Adicionalmente, puede ser necesario insertar más de un viaje en vacío para reducir la flota necesaria en una unidad, tal como se presenta en la **Figura 8**.

1.3.2.3 Desplazamiento de servicios en el tiempo (*Shifting Trip-departure Time*)

El resultado del proceso de *Time Table* debe ser una programación de servicios que mantiene una condición de equilibrio entre los costos de los usuarios y transportadores, y que de acuerdo a la técnica implementada, mantiene los estándares del servicio según los parámetros definidos por la persona responsable y experta en el desarrollo de la actividad. Por esta razón, no es deseable introducir cambios en los horarios de los servicios ya definidos, sin embargo, con el propósito de reducir la flota necesaria para la operación del sistema de transporte público, es posible realizar pequeños desplazamientos del tiempo de despacho de algunos servicios.

En la **Figura 9** se observan dos iteraciones de desplazamiento de algunos servicios de una programación inicial, que permiten reducir la flota en operación de 4 a 3 autobuses. Es necesario precisar que estos desplazamientos de tiempo deben estar dentro de una margen de tolerancia para no causar grandes trastornos al servicio planeado desde la etapa anterior.

Figura 9. Desplazamiento de servicios en el tiempo para reducir la flota en operación



Fuente. Public transit and planning operation - Avishai Ceder

1.4 CREW SCHEDULING

Como etapa final del proceso de planeación de la operación de un sistema de transporte público está la programación de conductores, quienes ejecutan toda la operación previamente planificada. Como insumo indispensable para el desarrollo de este proceso se tienen los itinerarios definidos para los autobuses en la etapa anterior, puesto que sobre esta base se definen los turnos que se programan a cada conductor.

Al igual que en la etapa anterior, se busca minimizar los costos relacionados con la operación, específicamente el costo del recurso humano. De esta forma, al momento de definir los servicios que prestará cada uno de los conductores, se busca minimizar la cantidad de personal requerido y el tiempo improductivo de parte de los conductores, es decir, los tiempos en que estén detenidos por esperar la salida de su siguiente servicio.

Para resolver este problema, se deben tener en cuenta todas las restricciones que impongan la legislación laboral de cada país y las políticas que en ese sentido pueda adoptar la empresa. Algunas de ellas son:

- Tiempo mínimo y máximo de jornada laboral
- Diferentes tipos de contratos en cuanto a duración de las jornadas (*24, 36 y 48 horas semanales*) y uso o no uso de horas extras.
- Descanso de un día por semana obligatorio.
- Número periodos de trabajo por jornada.
- Lugares de inicio de la jornada laboral.
- Tiempo mínimo de descanso.
- Restricciones por la salud de los conductores.
- Mayor requerimiento de personal en horas pico.

Adicional a la asignación de los turnos para una jornada de operación, también debe realizarse la programación semanal del personal, que debido a la operación continua de los sistemas de transporte requiere definir la mejor rotación del personal según los turnos establecidos para cada jornada, incluyendo días feriados. Algunas de las restricciones de este problema son:

- Balance de carga laboral entre todos los empleados, es decir, se busca minimizar la diferencia de horas laborales entre el conductor con mayor carga y el de menor carga.
- Máxima cantidad de días laborales consecutivos.
- Rotación de descansos.
- Tiempo de descanso entre las jornadas de diferentes días.
- Inasistencias por incapacidad u otros motivos.

- Turnos de conductores disponibles para movilizar autobuses a labores de mantenimiento y alistamiento.

La solución de este problema también requiere de la implementación de modelos de gran complejidad por la cantidad de restricciones y condiciones laborales de los empleados, como también por la dimensión de los sistemas de transporte que requieren de una gran cantidad de conductores para la prestación del servicio.

2 REVISIÓN DE ESTADO DEL ARTE

2.1 OPTIMAL MULTI-VEHICLE TYPE TRANSIT TIMETABLING AND VEHICLE SCHEDULING

(Ceder, 2011a) – ELSEVIER – Procedia Social and Behavioral Sciences 20 (2011) 19–30

Avishai (Avi) Ceder.

Transportation Research Centre, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Auckland, New Zealand.

Civil and Environmental Engineering Faculty, Technion-Israel Institute of Technology, Haifa, Israel.

Abstract

El autor presenta un método para construir *Time table* y *Vehicle Scheduling* incluyendo la variable de diferentes tipos y capacidades de vehículos. Propone ordenar las tipologías de éstos de acuerdo al costo de operación para desarrollar el *Vehicle Scheduling* y combinar las técnicas de intervalos iguales y cargas iguales para el *Time Table*. Desarrolla un algoritmo heurístico para resolver el problema.

Resumen

El autor parte de una introducción a la planeación de la operación, mencionando que para las etapas de *Time Table* y *Vehicle Scheduling*, tratadas en su trabajo, la primera debe seguir apropiadamente las variaciones de la demanda y satisfacer restricciones de nivel de servicio y frecuencia. Mientras que la segunda tarea usualmente se resuelve para un solo tipo de vehículo, cuando en realidad los sistemas de transporte tienen buses que ofrecen diferentes capacidades, confort y costos operacionales.

Time Table:

La generación de las tablas horarias se puede realizar empleando dos técnicas: *even headway (intervalo de paso igual)* y *even load (carga igual)*. Para el caso de los intervalos de paso iguales, se reduce la flexibilidad del programador para seguir apropiadamente la fluctuación de la demanda, generando situaciones operacionales indeseables, como lo son autobuses con muy poca o excedida ocupación. Muy baja ocupación genera ineficiencia por el bajo aprovechamiento de la capacidad de los autobuses, por su parte la ocupación excedida ocasiona inconformidad de parte del usuario, siendo importante mantener un equilibrio entre estas dos condiciones.

Cuando se usa la técnica de cargas iguales, se pueden presentar largos y extremadamente irregulares intervalos de paso incrementando los tiempos de espera de los usuarios.

Para superar los inconvenientes de cada técnica, el autor propone crear las tablas horarias usando autobuses de diferentes tipos y capacidades, permitiendo mantener intervalos de paso iguales con mínimas desviaciones respecto a la carga deseada.

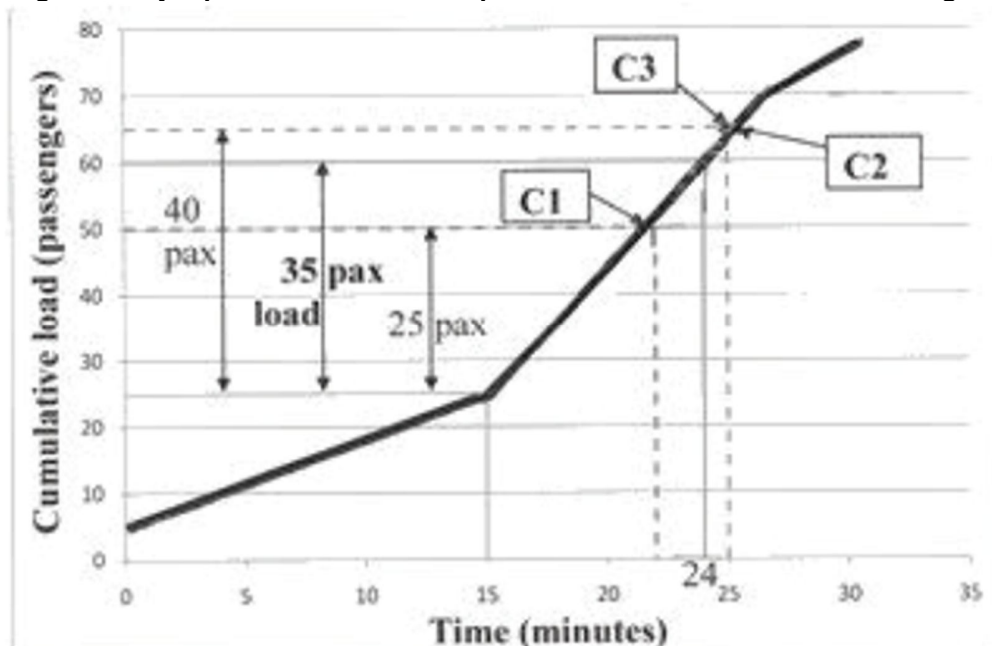
Siguiendo un procedimiento heurístico, el autor define los horarios de despacho de los servicios con intervalos iguales que garanticen satisfacer la máxima demanda, y a cada servicio se le define un tipo de vehículo de acuerdo a la carga que se consolida durante el *headway* previamente establecido. Dado que la selección del tipo de autobús es ambigua, se proponen tres estrategias:

Estrategia C1: Minimizar el tamaño del autobús, seleccionando el tipo de vehículo con mayor capacidad del grupo de tipologías con capacidad menor o igual al promedio de carga observado. Se puede presentar ocupación excedida en algunos autobuses.

Estrategia C2: Maximizar el tamaño del autobús, seleccionando el tipo de vehículo con menor capacidad del grupo de tipologías con capacidad mayor o igual al promedio de carga observado. Se puede presentar muy baja ocupación en algunos autobuses.

Estrategia C3: Seleccionar el tipo de vehículo con capacidad más cercana al promedio de carga observado. Esta estrategia puede llevar a ambas situaciones, de muy baja o excedida ocupación.

Figura 10. Ejemplo de selección de capacidad del autobús con las 3 estrategias



Fuente. Avishai (Avi) Ceder

Este procedimiento genera *Time Tables* que no garantizan el equilibrio de las cargas de los autobuses, por lo que combinarlo con la técnica de desplazamiento del tiempo de despacho de los servicios resulta en programaciones con tiempos desiguales pero más equilibrados en la carga. El autor en el desarrollo de su investigación examina diferentes políticas de desplazamiento con 21 diferentes combinaciones de estrategias y desplazamientos, de las cuales escoge la de mejor resultado.

Vehicle Scheduling

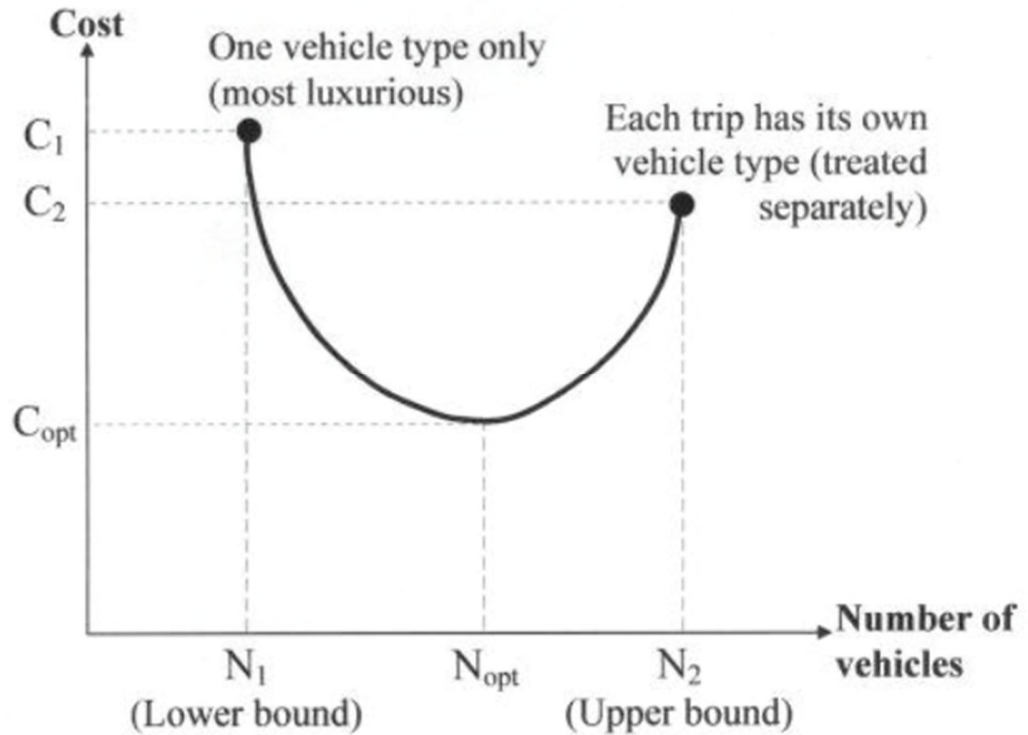
La generación de los itinerarios de los autobuses tiene como principal objetivo minimizar el tamaño de la flota, en el caso de un solo tipo de vehículo, y minimizar el costo de la operación en el caso de autobuses con diferentes capacidades. El autor propone su trabajo basado en la Función Déficit y la inserción de Viajes en Vacío de una terminal a otra para buscar la reducción del número de vehículos requeridos.

El problema que involucra múltiples tipos de autobuses está basado en una programación de servicios ya definida y un grupo de tipos de autobuses ordenados en orden descendente por el costo de usar uno u otro.

Por la complejidad que involucra buscar una solución óptima para un gran número de servicios programados, el autor considera más práctico proponer

un procedimiento heurístico, que comienza definiendo el límite inferior y superior del tamaño de la flota.

Figura 11. Optimización de Vehicle Scheduling



Fuente. Avishai (Avi) Ceder

El límite superior se refiere a la creación de diferentes Funciones Déficit asociadas cada una a un único tipo de autobús y que únicamente incluyen servicios programados para tipos de autobuses iguales o superiores al asociado. El límite inferior está relacionado con el uso del tipo de autobús más costoso.

Dentro de estos dos límites el algoritmo busca la solución de menor costo, basado en las propiedades y características de la Función Déficit.

Análisis del artículo

Tabla 2. Análisis del artículo: *Optimal Multi-Vehicle Type Transit Timetabling and Vehicle Scheduling*

Propuesta del artículo	Propuesta de este trabajo
Resolución de los problemas <i>Time Table</i> y <i>Vehicle Scheduling</i> para un sistema de transporte multiterminal y que permite la operación de diferentes tipologías de autobuses en una misma ruta, usando procedimientos heurísticos.	Usar un Algoritmo Genético y un planteamiento similar al problema empaquetamiento en una dimensión, para desarrollar la tarea de <i>Vehicle Scheduling</i> para rutas alimentadoras del sistema de transporte Masivo Megabús.
Las rutas pueden ir en servicio o en vacío entre los diferentes terminales de la red.	El diseño de red de rutas alimentadoras del sistema Megabús no considera que se presten servicios entre los tres terminales, es decir, cada ruta alimentadora del sistema Megabús tiene un único terminal de llegada.
Considera múltiples tipos de autobuses para la operación de las rutas.	Sólo se considera un tipo de autobús para la operación de las rutas alimentadoras.
A cada tipología se le asocia un costo de operación.	Se consideran costos por uso de flota en la operación, por tiempo inoficioso y se penaliza el cambio de ruta. Dado que los autobuses de una cuenca no pueden operar en la otra, la solución del problema se hace de forma independiente para cada una de ellas.

Propuesta del artículo	Propuesta de este trabajo
Se basa en la Función Déficit y las técnicas de inserción de viajes en vacío y desplazamiento de los tiempos de despacho para la minimización del costo de la tarea.	Se minimiza la flota a través de la técnica de empaquetamiento y el Algoritmo Genético. La inserción de viajes en vacío sólo puede darse entre los dos terminales de la cuenca Cuba. No se considera implementar el desplazamiento de los tiempos de despacho, dado que se parte de una programación de servicios que debe satisfacer las necesidades de los usuarios.
El artículo menciona la aplicación del procedimiento heurístico para el <i>Time Table</i> y relaciona beneficios en un sistema real. Sin embargo, no menciona la aplicación del procedimiento del <i>Vehicle Scheduling</i> .	Se usa un algoritmo genético y una formulación novedosa para solucionar el problema de <i>Vehicle Scheduling</i> para las rutas alimentadoras del sistema Megabus. El sistema Megabús tiene rutas alimentadoras con características operacionales diferentes a las del sistema propuesto en el estudio. Mayores frecuencias, tiempos de ciclo más cortos y menos flota para la operación.
El artículo no presenta formulación o diagramas de flujo de los procedimientos, sin embargo aporta conceptos muy importantes para la tarea de <i>Vehicle Scheduling</i> .	

Fuente. Elaboración propia

2.2 A COMPARISON OF DIFFERENT SOLUTION APPROACHES TO THE VEHICLE SCHEDULING PROBLEM IN A PRACTICAL CASE

(Baita et al., 2000) – PERGAMON – Computers & Operations Research 27 (2000) 1249-1269

F. Baita.

R. Pesenti.

Dipartimento di Elettrotecnica, Elettronica ed Informatica, Università di Trieste, Italy.

W. Ukovich.

Dipartimento di Automatica ed Informatica, Università di Palermo, Italy.

D. Favaretto.

Dipartimento di Matematica Applicata ed Informatica, Università di Venezia, Italy.

Abstract

Existe una amplia literatura sobre el problema de *Vehicle Scheduling*, sin embargo, usualmente no consideran todos los requerimientos prácticos de la realidad. Los autores proponen estudiar un caso real, desarrollando un modelo tradicional y dos heurísticos, de cuyos resultados hacen la comparación.

Resumen

Los autores proponen resolver la tarea de *Vehicle Scheduling* para el sistema de transporte de Mestre (*Venecia, Italia*), usando un Modelo de Asignación, un Método Heurístico y un Algoritmo Genético, cuyos resultados son comparados al final del artículo.

El problema de asignación de autobuses consiste en definir para cada vehículo cuáles servicios son los que debe prestar de una programación previamente definida para las rutas de un sistema de transporte. El objetivo es minimizar el número de autobuses y otros costos operacionales.

El sistema de transporte de Mestre ofrece diariamente más de 2500 servicios, dando cobertura a 80 localidades a través de 46 rutas, que son atendidas por cerca de 200 autobuses. Los autobuses no pueden ser asignados a cualquier ruta, puesto que hay tres diferentes tipos de autobuses, para los que se definen programaciones que no son compartidas,

de tal forma que el problema se divide en tres subproblemas separados. Dado que una de las tipologías de los autobuses presta muy pocos viajes, es muy fácil realizar la tarea de asignación de los servicios programados, por lo que los autores definen como objeto del estudio los subproblemas de los tipos de autobuses restantes.

En la práctica, se tienen en cuenta varios criterios para medir y valorar una posible solución del problema, algunos de ellos son:

- *Minimizar el número de autobuses:* La cantidad de autobuses requeridos tiene un gran impacto en la inversión por el alto costo de los vehículos, y en caso de ya contarse con una flota existente, una programación óptima facilita la administración de los recursos.
- *Minimizar el número de cambios de línea:* No es una restricción, sin embargo, por conveniencia de los conductores es favorable minimizar esta situación.
- *Minimizar el número y la longitud de viajes en vacío:* Estos viajes generan costos operacionales adicionales, además de insatisfacción de los usuarios que están esperando en un paradero
- *Minimizar los tiempos inoficiosos de los autobuses en las terminales:* estos tiempos incrementan el costo del personal y dificultan la programación de conductores.

Estos criterios suelen estar en conflicto y algunos pueden tener diferentes impactos y relevancias en la práctica. Resulta obvio que incrementar el tamaño de la flota requerida para reducir el número de viajes en vacío o cambios de ruta no es una buena elección, pero no es sencillo establecer un claro equilibrio entre estos criterios.

Adicionalmente a las usuales restricciones respecto a la factibilidad de la programación, se proponen dos condiciones más. La primera es un tiempo máximo permitido en las terminales, en caso de que se supere este límite el autobús debe regresar al patio o lugar de parqueo para luego regresar y continuar su servicio. La segunda es la “restricción de doble viaje”, requerimiento del problema de programación de conductores y consiste en que en caso de presentarse dos viajes consecutivos de más de 25 minutos, se debe garantizar al conductor 20 minutos de pausa distribuidos antes del primer viaje, en medio de los dos viajes y después del segundo.

Para el caso de aplicación a este trabajo, cuando los autores no conocían el tiempo de transferencia entre terminales, lo asumieron de 20 minutos, sin embargo esta información debe ser verificada por los programadores. De acuerdo a la realidad de la compañía y bajo la hipótesis de que ya está incluido en el tiempo de la ruta, no se incorpora una condición observada en

la literatura, consistente en forzar un corto intervalo entre dos viajes consecutivos.

Además, se analiza permitir un intervalo negativo entre dos viajes consecutivos, es decir, será viable que el segundo viaje de inicio unos minutos antes de que se finalice el primero, obviamente esto significa modificar el inicio o fin de uno de los dos viajes. Se debe verificar la factibilidad de mantener la parte restante de la programación y minimizar la inclusión de estos intervalos negativos.

Modelo de Asignación

En el modelo de asignación, todos los criterios del problema son representados por costos asociados a los arcos del gráfico bipartita, de tal forma que dos viajes consecutivos ejecutados por el mismo autobús están representados por un arco que une el nodo final del primero con el nodo inicial del segundo. Los arcos son divididos en dos grupos:

$$A = A_1 \cup A_2 \quad (4)$$

Dónde A_1 contiene los arcos que conectan los viajes compatibles y A_2 los arcos que conectan los viajes incompatibles, e indican el último viaje del itinerario de un autobús y el primer servicio del inicio del itinerario de otro. Los arcos de A_2 están relacionados con el uso de los vehículos, es decir, afectan el número de autobuses usados. Los arcos de A_1 corresponden a los diferentes costos operacionales que dependen de la decisión de programar en secuencia dos viajes en el itinerario de un mismo autobús.

La violación de algunos requerimientos del problema son penalizados aumentando el costo de los arcos correspondientes en A_1 y el incremento en el costo depende de la naturaleza y número de los criterios transgredidos.

El costo de adicionar servicios en vacío considera tres términos:

- $dhfix$ es el costo fijo por efectuar un servicio en vacío
- $dhdist * distance$ es un costo proporcional a la distancia entre las terminales en que se hace el servicio en vacío.
- $dhund$ es un costo fijo por efectuar un servicio en vacío que se considera, de parte de los programadores, particularmente malo o indeseado.

Se considera un costo fijo lc para cambios de línea y para el tiempo de espera en terminal se define la siguiente penalización:

$$wait * wt \quad \text{para} \quad wl \leq wt \leq wu \quad (5)$$

Donde $wait * wt$ es el costo proporcional al tiempo de espera, wl y wu son los límites inferior y superior del rango de tiempo de espera permitido. En caso de que se supere el límite superior, se incurre en un costo fijo.

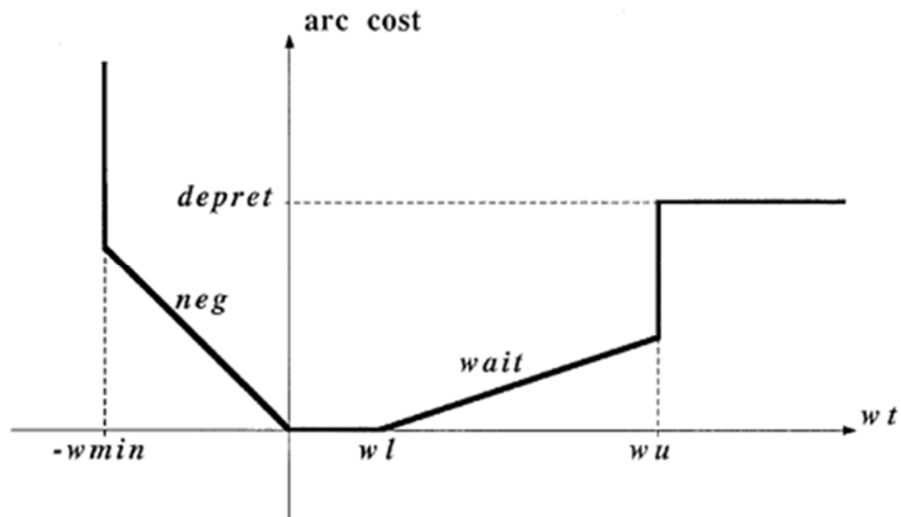
Finalmente la posibilidad de intervalos negativos entre dos servicios consecutivos se penaliza de la siguiente manera:

$$-negw * wt \quad \text{para} \quad -wmin \leq wt \leq 0 \quad (6)$$

Se corre el algoritmo con tres valores distintos del parámetro $wmin$, los resultados se observan en la **Tabla 3**, y los valores de los demás parámetros en la

Tabla 4.

Figura 12. Costo de un arco como función del tiempo de espera



Fuente. F. Baita, R. Pesenti, W. Ukovich, D. Favaretto

Tabla 3. Resultados del modelo de asignación

	Solution 1	Solution 2	Solution 3
Negative slack time (min)	0	3	5
Vehicles	189	182	175
Deadheading trips	374	363	367
Line changes	310	310	329
Trip shifts	/	20 (0.8%)	29 (1.1%)

Fuente. F. Baita, R. Pesenti, W. Ukovich, D. Favaretto

Tabla 4. Valores de los parámetros de costo para la solución de la Tabla 3

<i>nbus</i> (\$)	<i>dhfix</i> (\$)	<i>dhdist</i> (\$/km)	<i>dhund</i> (\$)	<i>lc</i> (\$)	<i>depret</i> (\$)	<i>wait</i> (\$/min)	<i>negw</i> (\$/min)	<i>wl</i> (min)	<i>wu</i> (min)	<i>wmin</i> (min)
20,000	1000	20	100	800	2000	100	2000	5	60	5

Fuente. F. Baita, R. Pesenti, W. Ukovich, D. Favaretto

Los autores realizan diferentes pruebas al algoritmo ajustando varios de los parámetros con el propósito de realizar un análisis de sensibilidad de las soluciones. En primera instancia se evalúa la afectación del equilibrio entre cantidad de autobuses y la inserción de viajes en vacío ajustando la relación $r = nbus/dhfix$, los resultados se observan en la **Tabla 5**. También se analizan los resultados que arroja el modelo con diferentes valores de *negw*, ver **Tabla 6**.

Finalmente se asume que buses de un tipo puedan ser usados en servicios reservados para el otro tipo de bus, incluyendo una penalización por asignar el bus “equivocado”. Se usa el parámetro *othtype* para ajustar el valor de la penalización, se corre el modelo únicamente para la hora pico de la mañana y sin permitir intervalos negativos. Los resultados se observan en la

Tabla 7.

Tabla 5. Cantidad de buses requeridos ajustando la relación $r=nbus/dhfix$

$r = nbus/dhfix$	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
No. of used buses	301	298	203	203	190	190	189	189
No. of deadh. trips	0	3	98	98	124	124	127	127

Fuente. F. Baita, R. Pesenti, W. Ukovich, D. Favaretto

Tabla 6. Análisis de sensibilidad con diferentes valores de $negw$

$negw$	1000	2000	5000	10,000	20,000
Used buses	173	175	181	185	185
Deadh. trips	367	367	363	361	361
Line changes	329	329	317	309	309
Trip shifts	43	29	9	0	0

Fuente. F. Baita, R. Pesenti, W. Ukovich, D. Favaretto

Tabla 7. Análisis de sensibilidad con diferentes valores de costo por asignación de un tipo de autobús equivocado

<i>othtype</i>	5000	10,000	15,000	17,500	20,000
Used buses	180	181	181	184	189
Deadh. trips	81	81	81	75	71
Line changes	97	94	94	83	76
Trips with “wrong” bus type	10	8	8	5	0

Fuente. F. Baita, R. Pesenti, W. Ukovich, D. Favaretto

Heurística basada en Programación Lógica

El algoritmo desarrollado es una técnica heurística que busca soluciones factibles para las restricciones y criterios establecidos en el problema. Cuando es necesario, gradualmente relaja algunas de las restricciones para construir el itinerario de los autobuses.

El punto crucial del algoritmo es cual restricción debe ser removida primero. Esta decisión debe ser tomada considerando la importancia del objetivo correspondiente, la variación en el espacio de soluciones o ambas. Se usa la siguiente estrategia de búsqueda:

- Primero, el algoritmo trata de conectar los viajes más cercanos que están en la misma ruta y terminal, satisfaciendo con el mínimo y máximo tiempo permitido en los terminales.
- Si la primera búsqueda falla, se remueve la restricción de mantener el autobús en la misma ruta, enlazando ahora los que están en el mismo terminal, siempre cumpliendo con las condiciones de tiempo de espera.
- En caso de resultados negativos, el algoritmo busca enlazar viajes de distintas terminales, siempre comenzando por el más cercano.

Los resultados obtenidos con el algoritmo de Programación Lógica se observan en la **Tabla 8**.

Tabla 8. Resultados con el algoritmo de Programación Lógica

	Solution 1	Solution 2	Solution 3
Negative slack time (min)	0	3	5
Vehicles	192	186	175
Line changes	490	500	500
Trips to modify /		64 (2.5%)	99 (3.9%)

Fuente. F. Baita, R. Pesenti, W. Ukovich, D. Favaretto

Algoritmo Genético

En este caso, la forma de representar la programación de autobuses es con un valor (alelo) en medio de una cadena (cromosoma), la posición del alelo representa el viaje que se debe ejecutar y el valor en esa posición representa el autobús que lo ejecuta, tal como se observa en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Representación de la programación de buses para el Algoritmo Genético

Trip	1	2	3	4	5	6
Vehicle	1	1	2	1	2	2

Fuente. F. Baita, R. Pesenti, W. Ukovich, D. Favaretto

Al tratar esta cadena se presenta dificultad en la compatibilidad de los viajes asignados al mismo autobús después de la operación de cruce de cromosomas que se lleva a cabo en el proceso, por tal razón, se propone un mecanismo de reparación que consiste en formar un individuo con una matriz y no una sola cadena, de tal forma, que la primer columna contiene los alelos dominantes y las siguientes contiene genes redundantes para reparar incompatibilidades.

En primera instancia, el Algoritmo Genético es aplicado al problema irrestricto, con el único objetivo de minimizar el número de vehículos para cubrir todos los viajes de la programación de rutas. Dado que no es considerado el costo operacional, cada individuo resultante es evaluado, en el sentido de que cada valor relacionado con un criterio es considerado por separado y de manera explícita, formando un frente de Pareto.

Una parte central del Algoritmo Genético es la selección de los individuos para reproducir la siguiente generación, para lo que se propone una variación a la *Selección por Torneo*, basándose en una serie de comparaciones entre dos individuos de los que se escoge al dominante. Un individuo domina a otro si todos sus criterios de evaluación no son peores y al menos en uno es estrictamente mejor.

Para asegurar la variedad de individuos proponen la selección geográfica, para la cual construyen subpoblaciones. Esta estrategia está basada en la idea de que la población tiene una particular estructura espacial y se subdivide en semi-aisladas subpoblaciones con relativas mixturas de genes, y se restringe el flujo de genes entre ellas, con el propósito de evitar que toda la población evolucione a individuos con las mismas características.

Para resolver el problema fue necesario dividir la programación de servicios en tres periodos de tiempo: el periodo pico, el periodo anterior y el posterior a éste. En la **Tabla 10** se pueden observar los resultados.

Tabla 10. Número de vehículos con el Algoritmo Genético

Time interval	Long vehicles	Regular vehicles	Total
1	30	47	77
2	84	104	188
3	52	58	116

Fuente. F. Baita, R. Pesenti, W. Ukovich, D. Favaretto

Estos resultados son similares a los encontrados con los otros dos métodos, sin embargo, fue necesario mucho más esfuerzo computacional que en los otros casos, al punto que una solución completa del problema puede tomar varias horas de tiempo computacional.

Comparación de resultados y conclusiones

Considerando los resultados del Algoritmo Genético los autores deciden no incluirlo en la comparación presentada en la **Tabla 11**.

Tabla 11. Resultados de Modelo de Asignación vs Programación Lógica

Slack time Method	0 min		– 3 min		– 5 min		— Real Situation
	AP	Logic Pr.	AP	Logic Pr.	AP	Logic Pr.	
Vehicles	189	192	186	182	175	175	202
Line changes	310	490	310	500	329	500	420
Trip shifts	/	/	20 (0.8%)	64 (2.5%)	29 (1.1%)	99 (3.9%)	/

Fuente. F. Baita, R. Pesenti, W. Ukovich, D. Favaretto

Los autores concluyen que existe gran ventaja en los resultados del Modelo de Asignación, aunque la Programación Lógica resulta una interesante herramienta para resolver este problema. En ambos casos se obtienen buenos resultados, puesto que en la compañía se requiere de varias personas trabajando durante aproximadamente un mes para obtener resultados similares.

Análisis del artículo

Tabla 12. Análisis del artículo: A comparison of different solution approaches to the vehicle scheduling problem in a practical case

Propuesta del artículo	Propuesta de este trabajo
<p>Solución del problema <i>Vehicle Scheduling</i> usando Modelo de Asignación, Programación Lógica y Algoritmos Genéticos, aplicado a un sistema de transporte real con la operación de tres tipos de autobuses, para los que se generan programaciones independientes. Las rutas pueden ir en servicio o en vacío entre los diferentes terminales de la red.</p>	<p>Usar un Algoritmo Genético y un planteamiento similar al problema empaquetamiento en una dimensión, para desarrollar la tarea de <i>Vehicle Scheduling</i> para rutas alimentadoras del sistema de transporte Masivo Megabús.</p>
<p>Considera múltiples tipos de autobuses para la operación de las rutas.</p>	<p>El diseño de red de rutas alimentadoras del sistema Megabús no considera que se presten servicios entre los tres terminales, es decir, cada ruta alimentadora del sistema Megabús tiene un único terminal de llegada.</p>
<p>Un tipo de autobús no puede operar la programación hecha para otra tipología, resolviendo problemas independientes en cada caso.</p>	<p>Sólo se considera un tipo de autobús para la operación de las rutas alimentadoras.</p>
<p>La minimización de la flota es objetivo principal y común entre los tres métodos utilizados. Para cada caso este objetivo está intrínseco en el desarrollo del modelo.</p>	<p>Dado que los autobuses de una cuenca no pueden operar en la otra, la solución del problema se hace de forma independiente para cada una de ellas.</p>
<p>Las técnicas de inserción de viajes en vacío y cambios de ruta son utilizados.</p>	<p>La minimización de la flota es el objetivo principal haciendo uso de una técnica de empaquetamiento en una dimensión y un Algoritmo Genético.</p>
<p>Para la técnica de desplazamiento de la hora de los despachos, consideran un intervalo negativo entre dos servicios consecutivos.</p>	<p>Se analiza el impacto en los resultados, al penalizar con diferentes niveles la variable de cambio de ruta.</p>
	<p>La inserción de viajes en vacío puede darse entre los dos terminales de la cuenca Cuba.</p>

Propuesta del artículo	Propuesta de este trabajo
	No se considera implementar el desplazamiento de los tiempos de despacho, dado que se parte de una programación de servicios que debe satisfacer las necesidades de los usuarios.
El artículo menciona la aplicación de los modelos desarrollados para el sistema de transporte de Mestre que tiene aproximadamente 2500 servicios, 46 rutas y aproximadamente 200 autobuses.	El trabajo se propone para las rutas alimentadoras del sistema Megabus, que está diseñado con 30 rutas de este tipo, más de 3000 servicios y cerca de 100 autobuses para la operación.
El Algoritmo Genético propuesto resuelve un problema irrestricto y no resulta computacionalmente eficiente. Además se resuelven sólo unos periodos de operación del día.	Se enfrenta el problema con una técnica de empaquetamiento en una dimensión y un Algoritmo Genético, considerando la variación de la operación durante todo el día.
El aporta conceptos muy importantes sobre variables y costos a considerar en la tarea de <i>Vehicle Scheduling</i> . Si bien no todos los conceptos aplican en todos los sistemas, facilitan hacer un análisis para determinar la pertinencia de éstos.	Los conceptos de minimización de tiempo de espera y cambios de ruta son relevantes en la solución propuesta.

Fuente. Elaboración propia

2.3 A STOCHASTIC PROGRAMMING APPROACH FOR ROBUST VEHICLE SCHEDULING IN PUBLIC BUS TRANSPORT

(Naumann et al., 2011) – ELSEVIER – Procedia Social and Behavioral Sciences 20 (2011) 826–835

Marc Naumann.

Leena Suhl.

Stefan Kramkowski.

Decision Support & Operations Research Lab, University of Paderborn, Warburger Str. 100, 33098 Paderborn, Germany.

Abstract

Los autores presentan un modelo de programación estocástica para desarrollar un robusto *Vehicle Scheduling* en transporte público. Usan escenarios de discontinuidades típicas de la operación, en busca de minimizar los costos planeados y los causados por las irregularidades que se presenten. El itinerario es representado por una red espacio – temporal que en sus arcos puede incluir penalizaciones independientes para cada conexión entre dos servicios consecutivos.

Resumen

La programación de autobuses tradicionalmente se planea semanas antes de su ejecución. Los autobuses son asignados a una programación de servicios previamente establecida, de tal forma que cada servicio es ejecutado por un único autobús. El objetivo, usualmente es minimizar los costos planeados, como lo son los costos fijos por vehículo y los costos variables por distancia recorrida y tiempo en operación fuera de los patios.

No obstante, los autores sustentan su trabajo en que durante un día de operación se presentan discontinuidades que causan retrasos respecto a la programación establecida, lo que incrementa los costos operacionales reales. En algunas propuestas de programación de autobuses, se incluye un tiempo de espera entre dos servicios consecutivos que permita cubrir los retrasos por situaciones anormales de la operación, sin embargo, esta estrategia incrementa los costos planeados, haciendo que un itinerario de autobuses con costos óptimos tienda a reducir su eficiencia al implementarla.

El principal objetivo de los autores es minimizar la suma de los costos planeados y los costos ocasionados por discontinuidad en la operación que son representados como penalización de acuerdo al retraso que se genere en la operación. Se busca obtener el escenario de menor costo de todos los posibles escenarios con retrasos. En este documento se entiende como programación de autobuses robusta, si su tolerancia al retraso es alta.

La función de distribución usada para los retrasos es la exponencial, en este trabajo los autores la amplían agregando un factor dependiente de la hora del día en que se preste el servicio, con el fin de considerar el impacto de las horas pico. Se consideran los retrasos en los servicios durante la operación, sin embargo, no son tenidos en cuenta los retrasos generados en viajes desde patios o en servicios que se adicionen en vacío entre terminales.

Inicialmente un servicio se retrasa cuando empieza puntual y finaliza después de la hora programada. En el modelo, los autores consideran un

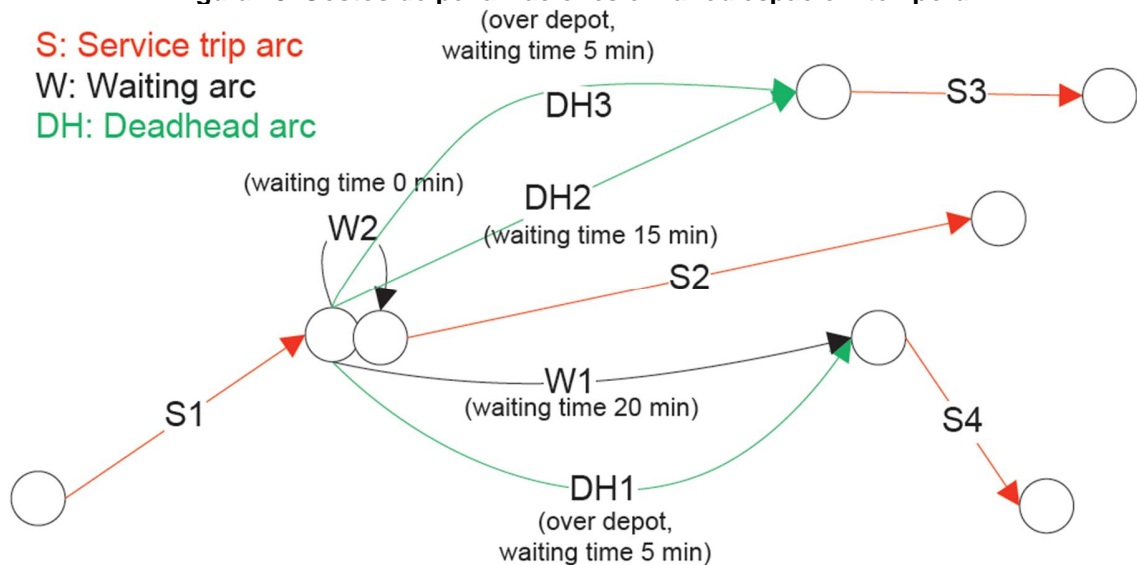
costo de penalización si este retraso causa también un retraso en la salida del servicio siguiente.

Usan una red espacio – temporal para la modelación, pero debido a los costos de penalización que se involucran, agregan arcos que representen los tiempos de espera y los viajes en vacío entre estaciones. Proponen cinco tipos de arcos de conexión entre dos arcos de servicios, tal como se observa en la

Figura 13:

- Un arco de tiempo de espera si los servicios finaliza (*el primero*) e inicia (*el siguiente*) en la misma estación en tiempos diferentes (**W1**)
- Un arco de tiempo de espera con valor cero (0) si los servicios finaliza (*el primero*) e inicia (*el siguiente*) en la misma estación y al mismo tiempo (**W2**)
- Un arco adicional de viaje en vacío se usa para modelar un viaje en vacío al patio, tiempo de espera en el mismo y el viaje en vacío de regreso a la misma estación, si hay suficiente tiempo para hacer esto (**DH1**)
- Un arco de viaje en vacío si los viajes finaliza (*el primero*) e inicia (*el siguiente*) en diferentes estaciones y hay suficiente tiempo para conectarlos (**DH2**)
- Un arco adicional de viaje en vacío se usa para modelar un viaje en vacío al patio, tiempo de espera en el mismo y el viaje en vacío de regreso a otra estación donde inicia el siguiente servicio, si hay suficiente tiempo para hacer esto (**DH3**)

Figura 13. Costos de penalizaciones en la red espacio – temporal



Fuente. Marc Naumann, Leena Suhl, Stefan Kramkowski.

De esta forma es posible penalizar cada conexión de forma independiente. Ningún arco puede ser excluido anticipadamente, puesto que puede ser dominado por los costos de otro y los costos de ambos dependen de los escenarios de retraso.

Modelo de optimización matemática

Los autores usan la siguiente formulación:

Sets

NL	<i>Conjunto de capas de la red</i>
F	<i>Conjunto de servicios</i>
ES_f	<i>Conjunto de todos los arcos de servicio representando el servicio f</i>
V_{nl}	<i>Conjunto de nodos en la capa de red nl</i>
E_{nl}	<i>Conjunto de arcos en la capa de red nl</i>

Parámetros

c_e	<i>Costo del arco e</i>
va_e	<i>Nodo de inicio del arco e</i>
ve_e	<i>Nodo de fin del arco e</i>

Variable

x_e	<i>Flujo en el arco e</i>
-------	--

Función Objetivo

$$\min \sum_{nl \in NL} \sum_{e \in E_{nl}} x_e * c_e \quad (7)$$

Restricciones de conservación de flujo

$$\sum_{i \in E_{nl} | va_i = v} x_i - \sum_{i \in E_{nl} | ve_i = v} x_i = 0 \quad \forall v \in V_{nl}, nl \in NL \quad (8)$$

Restricciones de cobertura

$$\sum_{e \in ES_f} x_e = 1 \quad \forall f \in F \quad (9)$$

Restricciones de integralidad

$$x_e \in Z \quad \forall e \in E_{nl}, nl \in NL \quad (10)$$

Límites

$$l_e \leq x_e \leq u_e \quad \forall e \in E_{nl}, nl \in NL \quad (11)$$

Los autores usan una función cuadrática para penalizar amplios retrasos. El costo de un retraso de α segundos puede llegar a ser tan alto como el costo fijo de un autobús por día. Por tanto, los costos de penalización para un arco e en un escenario s son:

$$penalty_{s,e} = y_{s,e}^2 * \frac{c_{nl}^{fix}}{\alpha^2} \quad (12)$$

$y_{s,e}$ es el retraso de inicio del servicio siguiente a la conexión del arco e en el escenario s o cero si el arco e no es usado. El parámetro c_{nl}^{fix} denota el costo fijo por usar un autobús en la capa de red nl . La función objetivo ahora se lee de la siguiente forma:

$$\min \sum_{nl \in NL} \sum_{e \in E_{nl}} c_e * x_e + \frac{1}{|S|} \sum_{nl \in NL} \sum_{e \in E_{nl}} \sum_{s \in S} \left(y_{s,e}^2 * \frac{c_{nl}^{fix}}{\alpha^2} \right) \quad (13)$$

S es el escenario seleccionado. Los costos de penalización sólo deben ser considerados para arcos con flujo mayor que cero, por lo que se debe incluir la siguiente restricción:

$$y_{s,e} = d_{s,e} * x_e \quad \forall s \in S, e \in E_{nl}, nl \in NL \quad (14)$$

El parámetro $d_{s,e}$ es el máximo valor entre cero y el retraso procedente del servicio anterior, menos el tiempo entre la finalización del primer servicio y la salida del siguiente.

Desafortunadamente éste es un modelo de optimización cuadrática y computacionalmente difícil. Pero dado que el flujo de cada arco es 0 o 1, y que la circulación por el arco no tendrá penalización, es posible reformular el modelo como un equivalente modelo lineal:

$$\begin{aligned}
& \min \sum_{nl \in NL} \sum_{e \in E_{nl}} c_e * x_e + \frac{1}{|S|} \sum_{nl \in NL} \sum_{e \in E_{nl}} \sum_{s \in S} \left(x_e^2 * \frac{d_{s,e}^2 c_{nl}^{fix}}{\alpha^2} \right) \\
& \xrightarrow{x_e \in (0,1)} \min \sum_{nl \in NL} \sum_{e \in E_{nl}} c_e * x_e + \frac{1}{|S|} \sum_{nl \in NL} \sum_{e \in E_{nl}} \sum_{s \in S} \left(x_e * \frac{d_{s,e}^2 c_{nl}^{fix}}{\alpha^2} \right) \quad (15) \\
& = \min \sum_{nl \in NL} \sum_{e \in E_{nl}} x_e * \left(c_e + \frac{1}{|S|} \sum_{s \in S} \frac{d_{s,e}^2 c_{nl}^{fix}}{\alpha^2} \right)
\end{aligned}$$

Ahora el modelo reformulado de optimización estocástica se lee de la siguiente forma:

Función Objetivo

$$\min \sum_{nl \in NL} \sum_{e \in E_{nl}} x_e * \left(c_e + \frac{1}{|S|} \sum_{s \in S} \frac{d_{s,e}^2 c_{nl}^{fix}}{\alpha^2} \right) \quad (16)$$

Restricciones de conservación de flujo

$$\sum_{i \in E_{nl} | v a_i = v} x_i - \sum_{i \in E_{nl} | v e_j = v} x_j = 0 \quad \forall v \in V_{nl}, nl \in NL \quad (17)$$

Restricciones de cobertura

$$\sum_{e \in ES_f} x_e = 1 \quad \forall f \in F \quad (18)$$

Restricciones de integralidad

$$x_e \in Z \quad \forall e \in E_{nl}, nl \in NL \quad (19)$$

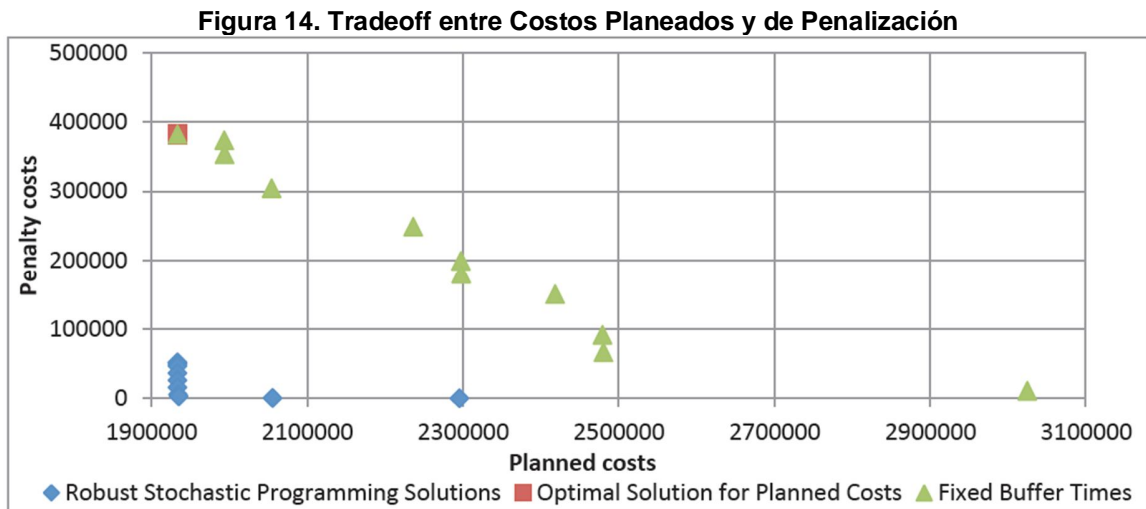
Límites

$$l_e \leq x_e \leq u_e \quad \forall e \in E_{nl}, nl \in NL \quad (20)$$

Resultados

Los autores usan para los cálculos un escenario real de una ciudad alemana con 426 servicios programados. En primera instancia presentan el *tradeoff* entre los costos planeados y los que surgen por penalizaciones por retrasos en la operación. Incluir tiempos entre la finalización de un servicio y el inicio del siguiente, permite “absorber” completa o parcialmente los retrasos que

puedan presentarse en algún servicio, permitiendo reducir algunos costos por penalizaciones, sin embargo esto incrementa los costos planeados. En la **Figura 14** se observa que soluciones con bajos costos planeados tienen altos costos de penalización por retrasos y las soluciones con bajos costos de penalización por retrasos tienen altos costos planeados.



Fuente: Marc Naumann, Leena Suhl, Stefan Kramkowski.

En la **Tabla 13** se puede observar la comparación entre las soluciones con programación estocástica y las soluciones de modelos más simples en las que sólo se incluyen tiempos entre servicios para absorber los retrasos. Se calculan diversos escenarios restringiendo los costos por penalización, y en todos los casos se encuentra que las soluciones encontradas con el modelo de programación estocástica son mejores en costos totales que las otras soluciones. Además, la mayoría de las soluciones no usan una cantidad de autobuses mayor que la de la solución para óptimos costos planeados.

En los primeros resultados, los costos por penalización son calculados cuando una discontinuidad en la operación causa un retraso para iniciar el siguiente servicio, sin embargo, la propagación de los retrasos no es considerada.

Debido a esto, los impactos de las discontinuidades en la operación y los costos resultantes son subestimados, por lo que se compensa esta situación dando otros valores al parámetro α , lo que cambia el impacto de los retrasos en los costos por penalización. Un valor bajo de α hace que pequeños retrasos impacten tanto como el valor de costo fijo por usar un autobús.

En la **Figura 15** se observa que las soluciones con programación estocástica resultan en menores costos totales que las soluciones con tiempos fijos entre

los servicios, considerando en ambos casos diferentes parámetros (Tiempos fijos entre servicios desde 15 hasta 1200 segundos y valores de α desde 180 hasta 3600 segundos).

Tabla 13 Comparación de Soluciones

Solution Approach	Total Costs	Planned Costs	Penalty	#Vehicles
Minimize planned costs	2315517	1933416	382100	32
Stochastic programming	1979398	1933416	45981	32
Stochastic programming	1969436	1933424	36012	32
Stochastic programming	1959322	1933487	25835	32
Stochastic programming	1949175	1933661	15514	32
Stochastic programming	1939493	1934322	5171	32
Stochastic programming	1937573	1934988	2586	32
Stochastic programming	2056077	2055563	514	34
Stochastic programming	2296140	2296140	0	38
Fix Buffer Time 15s	2367236	1993618	373619	33
Fix Buffer Time 30s	2347397	1994178	353219	33
Fix Buffer Time 60s	2358511	2054656	303856	34
Fix Buffer Time 1200s	3036038	3025127	10911	50

Fuente: Marc Naumann, Leena Suhl, Stefan Kramkowski.

Figura 15. Soluciones con tiempos fijos entre servicios y valores de α diferentes



Fuente: Marc Naumann, Leena Suhl, Stefan Kramkowski.

Análisis del artículo

Tabla 14. Análisis del artículo: *A stochastic programming approach for robust vehicle scheduling in public bus transport*

Propuesta del artículo	Propuesta de este trabajo
<p>Solución del problema <i>Vehicle Scheduling</i> con programación estocástica para considerar el impacto de los retrasos que pueden presentarse durante la operación diaria de un sistema de transporte.</p> <p>Para determinar el posible retraso se usa una función de distribución exponencial, ampliada con un factor que depende de la hora del día para considerar el impacto de las horas pico. Se basa en una red espacio – temporal que considera múltiples arcos por distintos tipos de penalización por retrasos.</p>	<p>No se consideran los retrasos que puedan presentarse durante la operación diaria.</p> <p>Se considera que se parte de una programación de servicios que incluye un análisis de tiempos de ciclo, que tiende a reducir los posibles retrasos por congestiones de tráfico habituales.</p>
<p>El objetivo principal es la minimización de costos planeados y costos por retrasos en la operación.</p>	<p>Se basa en un Algoritmo Genético que resuelve el problema formulándolo como uno de empaquetamiento en una dimensión.</p> <p>Se tienen en cuenta costos por uso de flota, cambios de ruta y tiempos de espera entre servicios.</p> <p>Los tiempos de espera propuestos no corresponden a los que puedan presentarse por retrasos en la operación diaria.</p>
<p>En el modelo de comparación se menciona la inclusión de tiempos entre la finalización de un servicio y el inicio del siguiente para absorber los retrasos y reducir los costos por penalización.</p>	<p>El objetivo principal es la minimización de la flota y los costos por tiempos de inactividad de la flota.</p> <p>En caso de querer considerar los tiempos para absorber posibles retrasos, éstos deben ser incluidos en la etapa de <i>Time Table</i>.</p>

Propuesta del artículo	Propuesta de este trabajo
El artículo menciona la aplicación de los modelos desarrollados para el sistema de transporte de una ciudad alemana con 426 servicios.	El trabajo se propone para las rutas alimentadoras del sistema Megabus con más de 3000 servicios.
Los autores manifiestan que el modelo con programación estocástica resulta favorable para ciudades pequeñas por su alto costo computacional.	

Fuente. Elaboración propia

2.4 PUBLIC-TRANSPORT VEHICLE SCHEDULING WITH MULTI VEHICLE TYPE

(Ceder, 2011b) – ELSEVIER – Transportation Research Part C 19 (2011) 485–497

Avishai (Avi) Ceder.

Transportation Research Centre, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Auckland, New Zealand.

Abstract

Según el autor, el propósito de este trabajo es direccionar el problema de *Vehicle Sceduling* considerando la asociación entre las características de cada viaje (*urbano, periférico, intermunicipal, etc*) con el tipo de vehículo requerido para un viaje en particular. El problema está basado en una programación de servicios previa y los tipos de vehículos para atenderlos, donde las categorías son ordenadas descendientemente según el costo vehículo. Se desarrolla un algoritmo heurístico basado en la teoría de la Función de Déficit.

Resumen

El autor menciona que la literatura que trata el problema de *Vehicle Sceduling* generalmente considera un único tipo de autobús en operación, sin embargo, en la práctica son requeridos varios tipos de ellos con diferentes tamaños, disponibilidad de sillas u otros aspectos. Generalmente la definición del tipo de vehículo que se requiere en la operación involucra dos consideraciones: primero, determinar el adecuado u óptimo tamaño del vehículo; segundo, escoger vehículos con diferentes niveles de confort, de acuerdo a las características del viaje.

El propósito de este trabajo es direccionar el problema de *Vehicle Sceduling* considerando la asociación entre las características de cada viaje con el tipo de vehículo requerido para realizarlo. Esto significa cumplir con cierto nivel de servicio para ese viaje: confort, disponibilidad de sillas y otros aspectos operacionales. Para esto considera la aplicación de la Función Déficit, la inserción de viajes en vacío y el desplazamiento de las horas de los despachos.

La propuesta del autor considera la aplicación de la Función Déficit que fue tratada en el capítulo anterior. Es una función escalonada que determina el número mínimo de vehículos requeridos para cumplir con una programación de servicios preestablecida para uno o varios terminales, en la operación de un sistema de transporte, es decir, representa el número de viajes que se realizan de forma simultánea en la operación.

Cuando se permite adicionar viajes en vacío entre terminales (*Deadheading*) a una programación de servicios previamente establecida, el número mínimo de vehículos requeridos puede ser reducido. Insertando viajes en vacío entre terminales hasta que no se encuentren más posibilidades o hasta que se consiga el límite inferior de la flota requerida $G(S)$, que es calculado con la suma de las funciones déficit definidas como $g(t, S) = \sum_{k \in T} d(k, t, S)$, donde $G(S) = \max g(t, S)$.

La teoría de la Función Déficit también permite realizar posibles desplazamientos en la hora de partida de algunos servicios, considerando algunas tolerancias en el tiempo permitido para éstos. Básicamente, el criterio de desplazamiento se basa en una tolerancia definida como $[t_s^i - \Delta_a^i, t_s^i - \Delta_d^i]$, donde Δ_a^i es el máximo valor permitido para un despacho adelantado y Δ_d^i es el máximo valor permitido para un despacho retrasado.

Para el caso de la inserción de viajes en vacío entre terminales, la selección de la terminal de destino puede depender de la restricción de capacidad que tenga, o por otra parte de aquella que tenga su primer valle (*espacio entre dos valores altos de la Función Déficit*) más lejos.

La optimización del problema se basa en una programación de servicios (S) y un grupo de tipos de autobuses (M) previamente establecidas. M debe ser organizado en orden descendente según el costo asociado a cada tipo de autobús, de tal forma que si $u \in M$ está listado arriba de $v \in M$, esto significa que $c_u > c_v$ donde c_u y c_v son los costos por emplear los tipos de autobuses u y v respectivamente.

Debido a la complejidad que involucra una solución óptima para número alto de viajes en S , el autor considera más práctico un método heurístico, que comienza por establecer los límites inferior y superior del tamaño de la flota. El límite superior se consigue con la creación de diferentes Funciones Déficit, asociadas con cierto tipo de vehículo $u \in M$ y que incluyen únicamente viajes cuyo menor tipo de vehículo requerido es u . El límite inferior se consigue usando sólo un tipo de vehículo, lo que resulta muy costoso por la necesidad de usar el autobús que pueda realizar todos los viajes de la programación de servicios, que resulta ser el tipo de vehículo con mayor costo asociado. En medio de estos dos límites, el algoritmo busca la mejor solución, basándose en las propiedades y características de la teoría de la Función Déficit.

En la **Tabla 15** se presentan notaciones adicionadas a la teoría de la Función Déficit.

Tabla 15. Notación adicionada a la teoría de Función Déficit

Notaciones	Descripción
M	Conjunto de todos los tipos de vehículos $u, u = 1, 2, \dots, m$, organizados en orden decreciente de acuerdo al costo asociado a cada tipo.
S_u	Conjunto de viajes para vehículos tipo $u, u = 1, 2, \dots, m$
S	$\bigcup_{u=1}^m S_u$ que es la programación de todos los servicios.
t_{su}^i	Tiempo de inicio del viaje $i \in S_u$ del tipo de vehículo $u \in M$
t_{eu}^i	Tiempo de fin del viaje $i \in S_u$ del tipo de vehículo $u \in M$
$\Delta_u^{i(+)}$	Máxima tolerancia de retraso para el viaje $i \in S_u$ del tipo de vehículo $u \in M$
$\Delta_u^{i(-)}$	Máxima tolerancia de adelanto para el viaje $i \in S_u$ del tipo de vehículo $u \in M$
$d_u(k, t, S_u),$ $D(k, S_u),$ $D(S_u),$ $[s_{iu}^k, e_{iu}^k],$ $g(t, S_u),$ $G(S_u)$	Definiciones de la Función Déficit, pero relacionadas con los viajes del tipo de vehículo $u \in M$
c_u	Costo asociado al emplear el tipo de vehículo $u \in M$
N_1	Mínimo número de autobuses requeridos para prestar todos los servicios de S , usando un único tipo de autobús $u = 1$
n_{2u}	Mínimo número de autobuses requeridos para prestar los todos servicios de $S_u, u \in M$
$N_2 = \sum_{u=1}^m n_{2u}$	Suma de todos los mínimos números de vehículos requeridos cuando se trata cada tipo por separado

Notaciones	Descripción
$C_1 = c_1 * N_1$	Total del costo asociado al usar N_1 vehículos del tipo 1 (más costoso)
$C_2 = \sum_{u=1}^m c_u * n_{2u}$	Total del costo asociado al usar N_2 vehículos (para cada tipo por separado)
$C = \sum_{u=1}^m c_u * n_{2u}$	Función Objetivo (Costo Total) siguiendo el algoritmo desarrollado, con n_u vehículos requeridos del tipo u para todo $u \in M$
$N = \sum_{u=1}^m n_{2u}$	Total del número de vehículos que incurren en C

Fuente. Avishai (Avi) Ceder

Para el procedimiento de solución del problema de *Vehicle Scheduling por tipo de vehículo*, el autor desarrolla un algoritmo heurístico por naturaleza que incorpora todos los componentes de la Función Déficit. Debido a las características gráficas asociadas a la Función Déficit, éste puede ser aplicado de forma interactiva o automática, permitiendo examinar los pasos intermedios.

Step 0: Organizar el conjunto de tipos de vehículos en orden descendente según el costo asociado.

Step 1: Solucionar el problema para un único tipo de vehículo usando la teoría de la Función Déficit, incluyendo la inserción de viajes en vacío entre terminales y desplazamiento de horas de despacho de servicios, para obtener N_1 vehículos del tipo 1, con un costo total C_1 .

Step 2: Dividir los servicios por sus tipos de vehículos asociados y aplicar la teoría de la Función Déficit, incluyendo la inserción de viajes en vacío entre terminales y desplazamiento de horas de despacho de servicios para cada tipo de vehículo por separado. Totalizar el número de vehículos de cada tipo para encontrar N_2 autobuses con un costo total C_2 .

Step 3: Si $N_1 = N_2$, para. Se usa la solución hallada en *Step 2*.

Step 4: Considerar $d_u(k, t)$ como en *Step 2* para todo $k \in K$ y $u \in M$.

Step 5: Realizar procedimiento de reducción de flota con desplazamiento del horario de despacho de los servicios, conservando las tolerancias establecidas.

Step 6: Encontrar un viaje en vacío entre terminales (*puede incluir desplazamiento del tiempo de despacho*), que permita la reducción

del número de vehículos y cumpla con la condición (a) y/o (b): establecidas.

(a) El viaje en vacío es desde una Función Déficit de un tipo de vehículo u a una Función Déficit de un tipo de vehículo v , de tal forma que $u \leq v$, significando que $c_u \geq c_v$.

(b) La cadena de viajes en vacío que se adiciona para reducir un vehículo de tipo w y que $-c_w + \sum_{q,r \in E} (c_q - c_r) \leq 0$, en donde el conjunto E está compuesto por todos los viajes en vacío incluidos en la cadena de viajes; cada viaje en vacío es desde una Función Déficit de un tipo de vehículo tipo r a una Función Déficit de un tipo de vehículo tipo q , en donde $q < r$. Si no es posible encontrar una cadena de viajes de esta forma, se detiene el proceso.

Step 7: Examinar si el costo total los viajes en vacío es menor que el costo total de reducir un autobús del tipo considerado. Si no, descartar la posibilidad y regresar a *Step 6*. De otra forma, actualizar $d_u(k, t)$ para todo $k \in K$ y $u \in M$.

Step 8: Chequear el mejorado número de autobuses. Si $D(S) = G''(S''_{sf})$ detenerse, de otra forma regresar a *Step 5*.

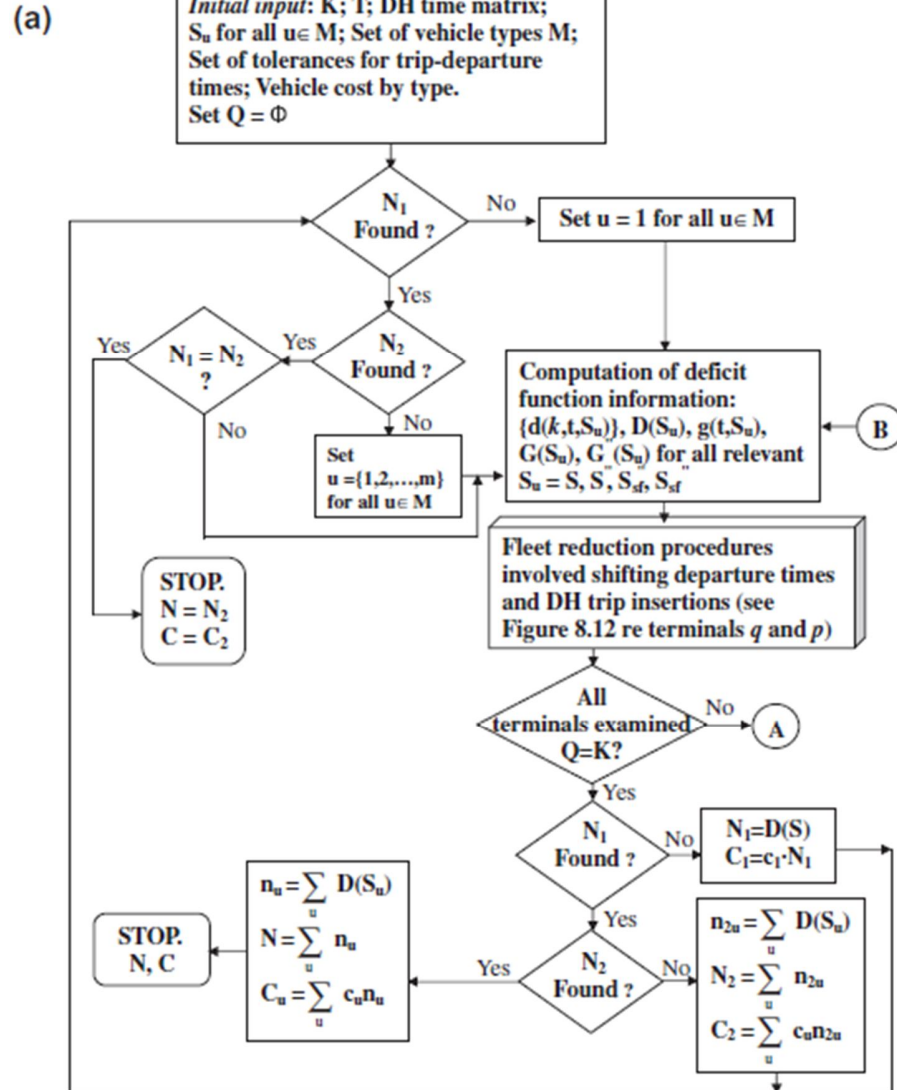
En las

Figura 16 y

Figura 17 se presenta el Diagrama de Flujo del algoritmo desarrollado.

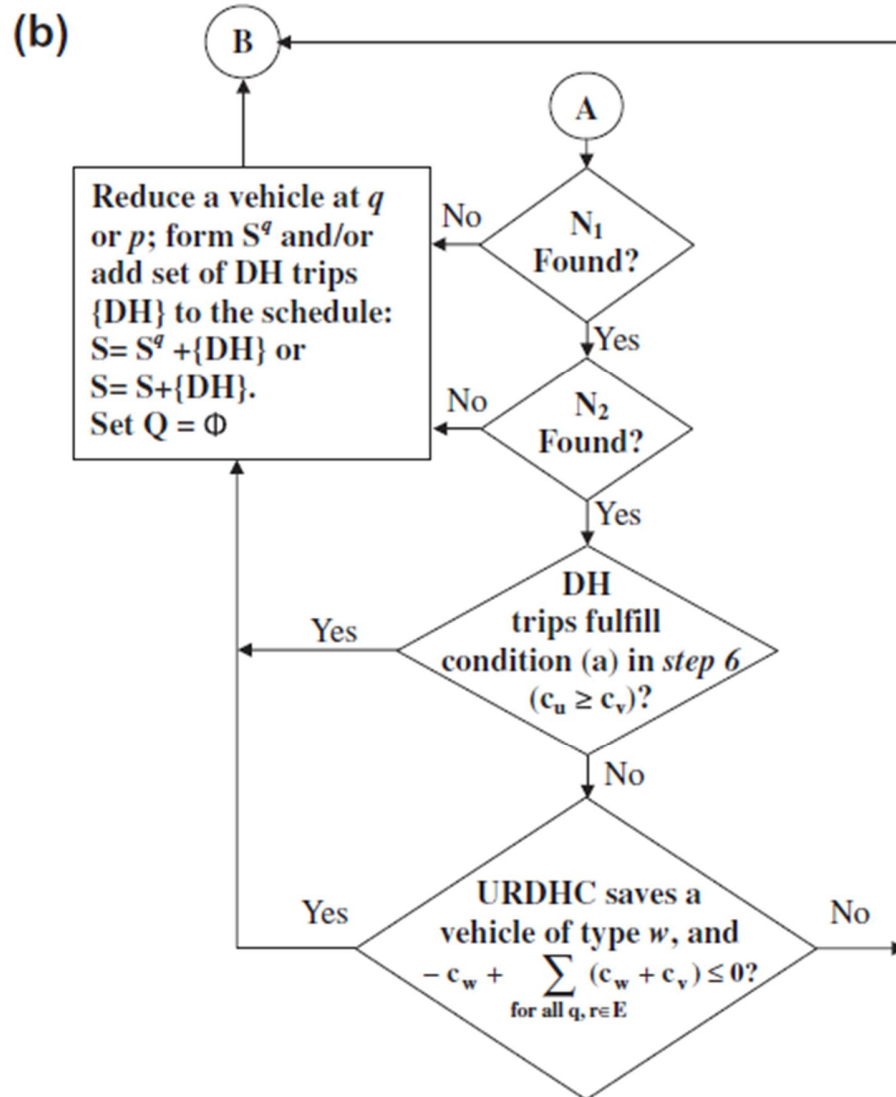
En caso de presentarse posibles ajustes en los costos asociados a cada tipo de autobús, se encuentra que si se mantiene el arreglo de los tipos de vehículo en orden decreciente según el costo asociado, sin que se modifique la posición de ninguna de las tipologías, los itinerarios arrojados para cada autobús serán los mismos y sólo cambia el valor del costo total.

Figura 16. Diagrama de Flujo del Algoritmo desarrollado – Parte A



Fuente. Avishai (Avi) Ceder

Figura 17. Diagrama de Flujo del Algoritmo desarrollado – Parte B



Fuente. Avishai (Avi) Ceder

Análisis del artículo

Tabla 16. Análisis del artículo: Public – transport vehicle scheduling with multi vehicle type

Propuesta del artículo	Propuesta de este trabajo
Resolución del problema <i>Vehicle Scheduling</i> para un sistema de transporte multiterminal que permite la operación de diferentes tipologías de autobuses en una misma ruta, usando procedimientos heurísticos.	Usar un Algoritmo Genético y un planteamiento similar al problema empaquetamiento en una dimensión, para desarrollar la tarea de <i>Vehicle Scheduling</i> para rutas alimentadoras del sistema de transporte Masivo Megabús.
Las rutas pueden ir en servicio o en vacío entre los diferentes terminales de la red.	El diseño de red de rutas alimentadoras del sistema Megabús no considera que se presten servicios entre los tres terminales, es decir, cada ruta alimentadora del sistema Megabús tiene un único terminal de llegada.
Considera múltiples tipos de autobuses para la operación de las rutas.	Sólo se considera un tipo de autobús para la operación de las rutas alimentadoras.
A cada tipología se le asocia un costo de operación.	Se consideran costos por uso de flota en la operación, por tiempo inoficioso y se penaliza el cambio de ruta. Dado que los autobuses de una cuenca no pueden operar en la otra, la solución del problema se hace de forma independiente para cada una de ellas.

Propuesta del artículo	Propuesta de este trabajo
Se basa en la Función Déficit y las técnicas de inserción de viajes en vacío y desplazamiento de los tiempos de despacho para la minimización del costo de la tarea.	Se minimiza la flota a través de la técnica de empaquetamiento y el Algoritmo Genético.
	La inserción de viajes en vacío sólo puede darse entre los dos terminales de la cuenca Cuba.
	No se considera implementar el desplazamiento de los tiempos de despacho, dado que se parte de una programación de servicios que debe satisfacer las necesidades de los usuarios.
El artículo menciona la aplicación del procedimiento heurístico para el <i>Vehicle Scheduling</i> en un sistema real con cuatro terminales y tres rutas que tienen entre 18 y 24 despachos al día.	El trabajo se propone para las rutas alimentadoras del sistema Megabus, que tiene tres terminales y 30 rutas agrupadas por terminal (16, 10 y 4 rutas).
	Cada ruta alimentadora puede tener entre 70 y 175 servicios cada día, de acuerdo a la demanda de usuarios.
El artículo presenta la descripción y diagrama de flujo del algoritmo heurístico desarrollado.	

Fuente. Elaboración propia

2.5 AN INTEGRATED APPROACH FOR TIMETABLING AND VEHICLE SCHEDULING PROBLEMS TO ANALYZE THE TRADE-OFF BETWEEN LEVEL OF SERVICE AND OPERATING COSTS OF TRANSIT NETWORKS

(Ibarra-Rojas et al., 2014) – ELSEVIER – Transportation Research Part B 70 (2014) 35–46

Omar J. Ibarra-Rojas.

Ricardo Giesen.

BRT – Centre of Excellence, Department of Transport Engineering and Logistics, Pontificia Universidad Católica de Chile, Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile.

Yasmin A. Rios-Solis.

Graduate Program in Systems Engineering, Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), Av. Universidad s/n, 66450 San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Mexico.

Abstract

En los sistemas de transporte existe un crítico equilibrio entre el nivel de servicio y los costos operacionales. A nivel de planeación de operación, este equilibrio es capturado en las tareas de *Time Table* y *Vehicle Scheduling*. En *Time Table*, los autores tratan de maximizar el número de pasajeros beneficiados con adecuados tiempos de trasbordo, mientras que en *Vehicle Scheduling* se busca minimizar el costo operacional relacionado con el tamaño de la flota. Este trabajo presenta dos modelos de programación lineal entera para ambos problemas, y los combina en un modelo integrado bi-objetivo, que permite analizar el equilibrio entre estos dos criterios en términos de frentes de Pareto.

Resumen

El proceso de planeación de una red de buses puede ser dividido en dos etapas principales. La primera es una etapa táctica en la que se diseñan los recorridos de las rutas y se define la programación de servicios (hora de despacho de todos los servicios), y se enfoca en ofrecer altos estándares en el nivel de servicio a los usuarios: frecuencia, cortos tiempos de espera, cortas transferencias y otros aspectos. La segunda etapa es la planeación operacional, donde se consideran la programación de autobuses y operadores, buscando minimizar el costo operacional del sistema de transporte. Usualmente, para resolver el proceso completo de planeación se desarrollan secuencias de modelos en los que los resultados de uno o más son tomados como entradas para el subproblema siguiente. Para los autores, este enfoque resulta en soluciones sub-óptimas para el proceso completo.

- *Time Table* es el conjunto de las horas de partida de todos los viajes, maximizando las transferencias de pasajeros con tiempos adecuados en algunos de las principales paradas.
- *Vehicle Scheduling* determina el conjunto de viajes que ejecutará un vehículo durante un día de operación, reduciendo los costos basados en el tamaño de la flota en uso. En este estudio se considera el problema con un único depósito.

La

Figura 18 presenta el tipo de solución que se quiere obtener en este trabajo: son tres rutas (*líneas de bus*) que inician y terminan en el mismo lugar, cada línea tiene sus propios servicios programados de 8:00 a 12:00 cada día, con un tiempo de viaje completo de una hora. Las tres rutas son atendidas con la misma flota de 10 autobuses. *Time Table* se refiere a las horas de salida de cada viaje de cada ruta, mientras que *Vehicle Scheduling* corresponde a la asignación estos viajes a los autobuses.

Los autores argumentan que un pequeño cambio en *Time Table* puede cambiar drásticamente el resultado del *Vehicle Scheduling*, puesto que si se supone que el viaje 3 de la línea 1 tiene su hora de despacho 3 minutos antes, el autobús *a* no lograría cubrir este servicio y toda la asignación de viajes a los autobuses debería ser ajustada.

Figura 18. Solución a los problemas de programación de servicios y autobuses

Line 1								
Trips	1	2	3	4	5	6	7	8
TT	8:03	8:33	9:05	9:33	10:00	10:32	11:07	11:40
VS	a	b	a	c	b	a	b	d

Line 2							
Trips	1	2	3	4	5	6	7
TT	8:01	8:42	9:25	10:02	10:43	11:20	11:58
VS	d	e	f	d	c	e	a

Line 3												
Trips	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
TT	8:10	8:32	8:51	9:14	9:31	9:55	10:14	10:35	10:56	11:17	11:40	11:59
VS	f	g	h	i	j	g	h	f	i	h	c	f

Fuente: Omar J. Ibarra-Rojas, Ricardo Giesen, Yasmin A. Rios-Solis.

Tanto el nivel de servicio como los costos operacionales son importantes en la operación de un sistema de transporte. Un alto nivel de servicio garantiza beneficios sociales, pero es necesario reducir los costos operacionales para tener un sistema rentable. Dado que estos dos factores están naturalmente en conflicto, los autores proponen definir un modelo que tenga en cuenta el equilibrio entre ellos, para optimizar los resultados de ambos problemas. Para esto, se propone integrarlos en un modelo de optimización bi-objetivo, que es resuelto mediante un método ϵ -restringido para obtener la curva de equilibrio exacto entre las transferencias a tiempo de los pasajeros y el tamaño de la flota. De esta manera, se obtienen resultados de ambos problemas de manera simultánea, evitando modelos secuenciales y permitiendo estudiar la relación entre estos dos criterios del proceso de planeación de la operación.

Time Table enfocado en transferencias de pasajeros

El tipo de red de interés se representa por un grupo de rutas (*líneas*) denotadas como I . Los recorridos, sus paradas y frecuencias son las entradas requeridas. Se denota como B el grupo de todos los nodos de transferencia, y como B^{ij} el grupo de nodos en los que los usuarios realizan trasbordo de la línea i a la línea j (no necesariamente viceversa). Debido al comportamiento de la demanda de pasajeros y la variabilidad de los tiempos de viaje, se divide el día en pequeños periodos de planeación, permitiendo emplear parámetros determinísticos con cada periodo y de esta forma construir la programación de servicios de todo un día. Por esto, se denota S como el grupo de todos los periodos de tiempo en que se divide un día.

El parámetro d_s , con $s \in S$, representa el fin del periodo de planeación i y el comienzo del periodo $s + 1$. Sea f^i el total de viajes de la línea i durante el día, mientras que f_s^i denota el número de viajes de la línea i en el periodo s , esto es $f^i = \sum_{s \in S} f_s^i$. Se usa la notación $i(p)$ para el indicar el viaje número p de la línea i , $i(first_s)$ para el indicar el primer viaje de la línea i en el periodo s y $i(last_s)$ para el indicar el último viaje de la línea i en el periodo s . Finalmente, el tiempo de viaje de $i(p)$ desde el nodo inicial hasta el nodo b es denotado como t_p^{ib} .

Se considera que una transferencia exitosa entre las líneas i y j en el nodo $b \in B^{ij}$ sucede cuando la diferencia entre el tiempo de llegada de los viajes $j(q)$ y $i(p)$ está dentro de una específica ventana de tiempo $[w_{pq}^{ijb}, W_{pq}^{ijb}]$, que puede tener en cuenta el mínimo tiempo que le toma a un pasajero caminar de una línea a la otra, y también el tiempo de permanencia de la línea j en el nodo b .

Para generar el *Time Table*, es necesario definir las variables X_p^i que corresponden a las horas de salida de cada viaje $1 < p < f^i$ de cada línea $i \in I$. Y la variable binaria Y_{pq}^{ijb} que es igual a uno si se da una transferencia exitosa de $i(p)$ con $j(q)$ en el nodo b , esto es:

$$Y_{pq}^{ijb} = \begin{cases} 1 & \text{Si } (X_q^j + t_q^{jb}) - (X_p^i + t_p^{ib}) \in [w_{pq}^{ijb}, W_{pq}^{ijb}] \\ 0 & \text{en los demás casos} \end{cases} \quad (21)$$

Para todo i y j que pertenecen a I , $1 < p < f^i$, $1 < q < f^j$ y $b \in B^{ij}$.

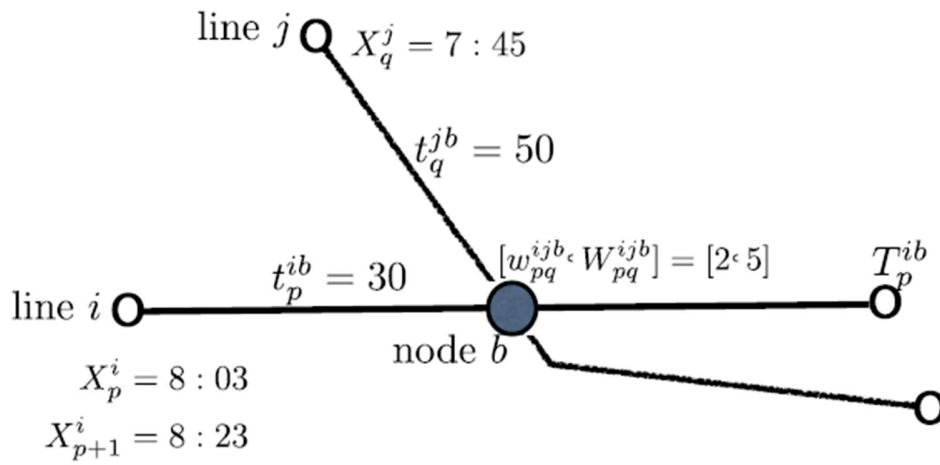
En la

Figura 19 se observan las líneas i y j que permiten transferencia de una a la otra en el nodo b . La línea i tiene un intervalo de paso de 20 minutos y los viajes $i(p)$ y $j(q)$ pueden tener una transferencia exitosa en el nodo b , dado que sus tiempos de llegada al lugar de intercambio difieren sólo en tres

minutos, que es el tiempo mínimo que requieren los pasajeros para cambiar de una línea a la otra.

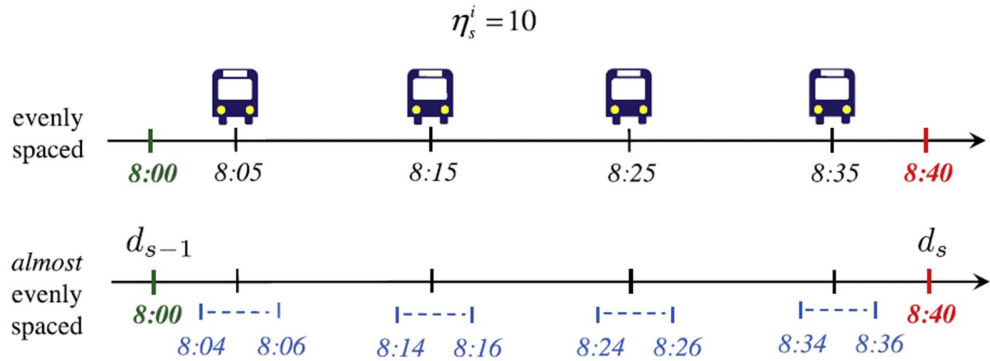
En algunos casos, para incrementar el nivel de servicio de los usuarios, se flexibiliza la hora de despacho de cada servicio, esto significa que definido un intervalo de paso entre cada autobús de una misma línea, se permite el despacho real de cada autobús unos minutos antes o después del ya definido, tal como se observa en la **Figura 20** donde se tiene una línea con intervalo de paso de 10 minutos y una flexibilidad de un minuto antes o después de la hora programada.

Figura 19. Líneas i y j y transferencia en el nodo b



Fuente: Omar J. Ibarra-Rojas, Ricardo Giesen, Yasmin A. Rios-Solis

Figura 20. Flexibilidad en las horas de despacho



Fuente: Omar J. Ibarra-Rojas, Ricardo Giesen, Yasmin A. Rios-Solis

Los autores proponen una formulación enfocada en los pasajeros beneficiados por trasbordos o transferencias exitosas. Para determinar este número, se asume que la demanda de pasajeros es constante en cada periodo para cada línea y que el número de pasajeros que hacen transferencia de la línea i a la j es proporcional a la carga del autobús.

Además, si se asume un intervalo de paso igual durante el periodo, es posible obtener un número estimado max_s^{ijb} de pasajeros que realizan trasbordo de la línea i a la j en algún nodo de transferencia b para cada periodo de planeación $s \in S$. Basados en estas presunciones, el número real de pasajeros PAX_p^{ijb} que pueden ser beneficiados con una transferencia exitosa de un viaje específico $i(p)$, en un periodo de planeación s , a una línea j en un nodo b depende del intervalo de paso real de la línea alimentadora i , y puede ser expresado de la siguiente forma:

$$PAX_p^{ijb} = max_s^{ijb} + \alpha_s^{ijb}(X_p^i - X_{p-1}^i - \eta_s^i) \quad (22)$$

Donde α_s^{ijb} es el número de pasajeros, perdidos o ganados, que transfieren de $i(p)$ a la línea j en el nodo b debido a la desviación del intervalo de paso η . Dado que la demanda es constante a lo largo del periodo de planeación, este parámetro puede ser definido como $\alpha_s^{ijb} = \frac{max_s^{ijb}}{\eta_s^i}$. Si el intervalo de paso $X_p^i - X_{p-1}^i$ es cero, no habría pasajeros en $i(p)$ para trasbordar a la línea j . Por lo tanto, los pasajeros que hacen transferencia con una exitosa sincronización son expresados como sigue:

$$PS_p^{ijb} = PAX_p^{ijb} \sum_{q=1}^{f^j} Y_{pq}^{ijb} \quad (23)$$

Entonces, el problema de *Time Table* enfocado en transferencias de pasajeros tiene la siguiente formulación de Programación Lineal Entera Mixta:

$$\max F_{TT}(X) = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J(i)} \sum_{b \in B^{ij}} \sum_{p=1}^{f^i} PS_p^{ijb} \quad (24)$$

Sujeto a:

$$d_{s-1} + \frac{\eta_s^i}{2} + (p - i(first_s))\eta_s^i - \delta_s^i \leq X_p^i \quad (25)$$

$\forall i \in I, s \in S, i(first_s) < p < i(last_s)$

$$X_p^i \leq d_{s-1} + \frac{\eta_s^i}{2} + (p - i(first_s))\eta_s^i + \delta_s^i \quad (26)$$

$\forall i \in I, s \in S, i(first_s) < p < i(last_s)$

$$\begin{aligned} (X_q^j + t_q^{jb}) - (X_p^i + t_p^{ib}) &\geq w_{pq}^{ijb} - M(1 - Y_{pq}^{ijb}) \\ \forall i \in I, j \in J(i), b \in B^{ij}, 1 \leq p \leq f^i, 1 \leq q \leq f^j \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} (X_q^j + t_q^{jb}) - (X_p^i + t_p^{ib}) &\leq W_{pq}^{ijb} - M(1 - Y_{pq}^{ijb}) \\ \forall i \in I, j \in J(i), b \in B^{ij}, 1 \leq p \leq f^i, 1 \leq q \leq f^j \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} PAX_p^{ijb} &= pax_s^{ijb} + \alpha_s^{ijb} (X_p^i - X_{p-1}^i - \eta_s^i) \\ \forall i \in I, j \in J(i), b \in B^{ij}, 1 \leq p \leq f^i, 1 \leq q \leq f^j \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} a_p^{ijb} \sum_{q=1}^{f^i} Y_{pq}^{ijb} &\leq PS_p^{ijb} \leq b_p^{ijb} \sum_{q=1}^{f^i} Y_{pq}^{ijb} \\ \forall i \in I, j \in J(i), b \in B^{ij}, 1 \leq p \leq f^i \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} PAX_p^{ijb} - b_p^{ijb} \left(1 - \sum_{q=1}^{f^i} Y_{pq}^{ijb} \right) &\leq PS_p^{ijb} \\ \forall i \in I, j \in J(i), b \in B^{ij}, 1 \leq p \leq f^i \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} PAX_p^{ijb} - a_p^{ijb} \left(1 - \sum_{q=1}^{f^i} Y_{pq}^{ijb} \right) &\geq PS_p^{ijb} \\ \forall i \in I, j \in J(i), b \in B^{ij}, 1 \leq p \leq f^i \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} X_p^i &\in \mathbb{R}, PAX_p^{ijb} \in \mathbb{R}, PS_{pq}^{ijb} \in \mathbb{R}, Y_{pq}^{ijb} \in \{0,1\} \\ \forall i, j \in I, 1 \leq p \leq f^i, 1 \leq q \leq f^j, b \in B^{ij} \end{aligned} \quad (33)$$

Las restricciones (25) y (26) garantizan que cada viaje se realice dentro de su ventana de tiempo factible. Las restricciones (27) y (28) permiten fijar $Y_{pq}^{ijb} = 1$ cuando la separación de tiempo entre las llegadas de los viajes $i(p)$ y $j(q)$ están entre la ventana de tiempo $[w_{pq}^{ijb}, W_{pq}^{ijb}]$. Si $Y_{pq}^{ijb} = 0$ estas restricciones son redundantes, dado que el parámetro M es un número alto que puede ser fácilmente delimitado, considerando que es posible determinar un intervalo factible para cada hora de partida. La restricción (29) representa los pasajeros que pueden ser beneficiados por transferencias exitosas. Finalmente, las restricciones de la (30) a la (32), son la linealización de $PS_p^{ijb} = PAX_p^{ijb} \sum_{q=1}^{f^j} Y_{pq}^{ijb}$ que cuenta los pasajeros beneficiados con transferencias exitosas. Para lograr esta linealización se usa el implícito intervalo de tiempo factible para PAX_p^{ijb} dado por $[a_p^{ijb}, b_p^{ijb}] = [pax_s^{ijb} - \alpha_s^{ijb} \delta_s^{ijb}, pax_s^{ijb} + \alpha_s^{ijb} \delta_s^{ijb}]$.

Vehicle Scheduling con flota homogénea y un único depósito

Los autores presentan una formulación de Programación Lineal Entera Mixta para el problema de *Vehicle Scheduling* con flota homogénea y un único depósito. En casos de una red amplia, se deben usar varios problemas de *Vehicle Scheduling* independientes, uno por cada tipo de flota.

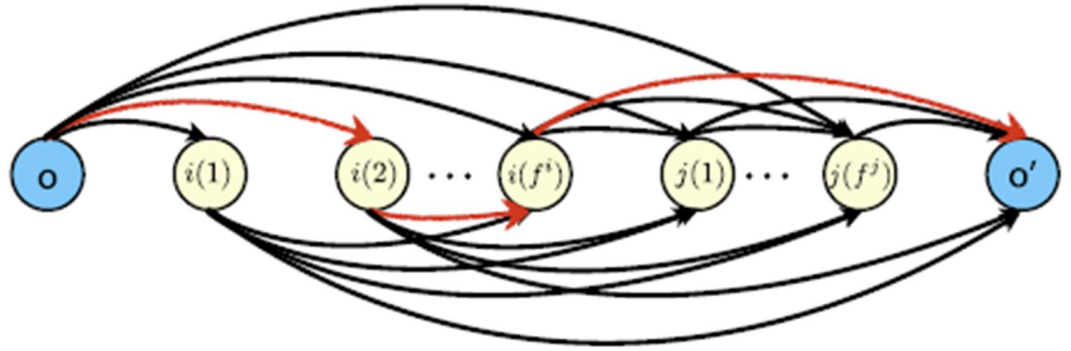
Se define Γ como el conjunto de flotas homogéneas. El conjunto $I(\gamma)$ representa el conjunto de líneas que pueden ser cubiertas por cada tipo de flota $\gamma \in \Gamma$, donde $\bigcup_{\gamma \in \Gamma} I(\gamma) = I$ y $I(\gamma) \cap I(\gamma') = \emptyset$, para todo $\gamma \neq \gamma'$. Cada tipo de flota tiene γ un limitado número de autobuses representado como $size^\gamma$. Las variables de decisión asignan viajes a los vehículos de entre todos los posibles y son definidas como sigue:

$$V_{pq}^{ij\gamma} = \begin{cases} 1 & \text{Si un bus de la flota } \gamma \text{ realiza el viaje } j(q) \text{ despues del } i(p) \\ 0 & \text{En los demás casos} \end{cases} \quad (34)$$

Para todo $\gamma \in \Gamma$, $i, j \in I(\gamma)$, $1 \leq p \leq f^i$, $1 \leq q \leq f^j$. Para esta formulación se asume que un autobús inicia en su depósito, denotado como viaje *dummy* o, entonces realiza una serie de viajes hasta finalizar su jornada y regresar a su depósito, denotado como viaje *dummy* o'.

En la **Figura 21** se observa la red (N^γ, A^γ) para una específica flota $\gamma \in \Gamma$, donde el conjunto de nodos N^γ representan los viajes y un arco $(i(p), j(q)) \in A^\gamma$ existe si es posible cubrir el viaje $j(q)$ después de haber realizado el viaje $i(p)$ con el mismo autobús. Esta red es definida por posibilidad de activación de la variable $V_{pq}^{ij\gamma}$ entre cada par de viajes $i(p), j(q)$. Finalmente, un camino de o a o' representa el itinerario de un vehículo y el número de caminos determina el tamaño de la flota.

Figura 21. Red de activación de la variable de decisión



Fuente: Omar J. Ibarra-Rojas, Ricardo Giesen, Yasmin A. Rios-Solis

En particular, si se tiene la programación de servicios los valores de las variables X_p^i serán dados como la entrada para el problema de programación de autobuses.

$$\min F_{VS}(X) = \sum_{\gamma \in \Gamma} \sum_{i \in I(\gamma)} \sum_{p=1}^{f^i} \left(cv^\gamma * V_{op}^{i\gamma} + cdh^{ij\gamma} \sum_{j \in I(\gamma)} \sum_{q=1}^{f^j} V_{pq}^{ij\gamma} \right) \quad (35)$$

Sujeto a:

$$X_q^j - (X_p^i + r_p^i + dh^{ij}) \geq -M(1 - V_{pq}^{ij\gamma}) \quad (36)$$

$$\forall \gamma \in \Gamma, i \in I(\gamma), j \in I(\gamma), 1 \leq p \leq f^i, 1 \leq q \leq f^j$$

$$\sum_{j \in I(\gamma)} \sum_{q=1}^{f^j} V_{pq}^{ij\gamma} = \sum_{j \in I(\gamma)} \sum_{q=1}^{f^j} V_{qp}^{ji\gamma} \quad \forall \gamma \in \Gamma, i \in I(\gamma), 1 \leq p \leq f^i \quad (37)$$

$$\sum_{i(p) \in N(\gamma)} V_{op}^{i\gamma} \leq size^\gamma \quad \forall \gamma \in \Gamma \quad (38)$$

$$V_{pq}^{ij\gamma} \in \{0,1\} \quad \forall \gamma \in \Gamma, i, j \in I(\gamma), 1 \leq p \leq f^i, 1 \leq q \leq f^j \quad (39)$$

El caso de estudio presentado está enfocado en el tamaño de la flota, sin embargo, en la función objetivo se consideran los costos por uso de vehículo y por la implementación de viajes en vacío, con el propósito de mostrar que se pueden considerar ambos aspectos sin modificar la metodología propuesta.

Las restricciones garantizan que la variable $V_{pq}^{ij\gamma}$ sea uno si hay suficiente tiempo para que un vehículo haga un viaje, tenga un alistamiento y luego haga el viaje siguiente; que exactamente un único vehículo sea asignado a cada viaje y que no se supere el número de vehículos por cada tipo de flota.

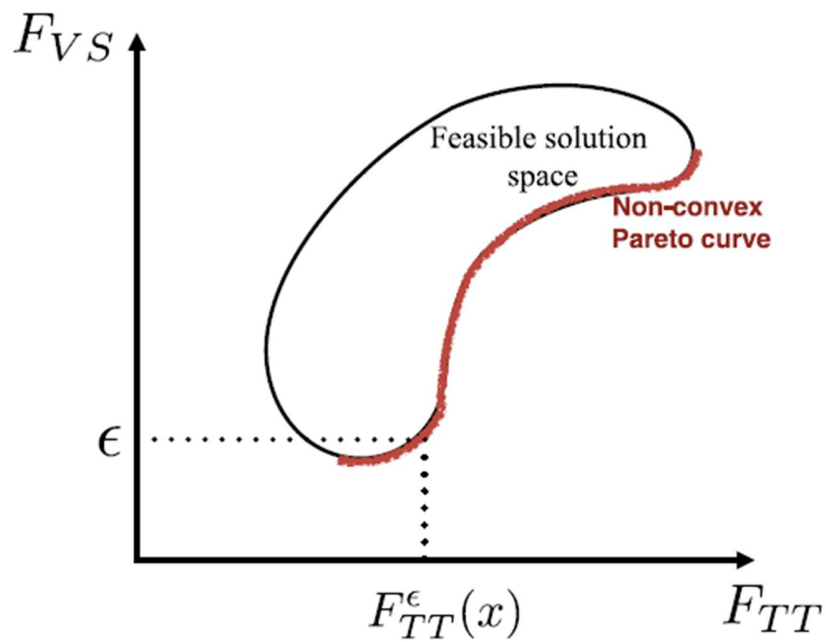
Modelo de solución ϵ -restringido para los problemas de *Time Table* y *Vehicle Scheduling*

A partir de las soluciones propuestas de forma independiente para cada problema, los autores presentan un modelo integrado bi-objetivo para resolver ambos problemas de forma simultánea, buscando maximizar el nivel de servicio dado en *Time Table*, a la vez que minimizan el costo operacional asociado al *Vehicle Scheduling*. En contraste con un solo objetivo de optimización, se tiene interés en óptimas soluciones en un frente de Pareto, esto es, las curvas de equilibrio entre los valores de diferentes funciones objetivo.

La información acerca del equilibrio entre el nivel de servicio y el costo operacional es valiosa para ayudar al planificador de la operación en el desarrollo de su tarea, sin embargo, es muy difícil para él expresar una explícita aproximación de la función de preferencia o específicos niveles para los diferentes criterios. En este caso, los autores proponen permitir al planificador de la operación escoger de un grupo de soluciones, para lo cual se usa el algoritmo ϵ -restringido para resolver los problemas de *Time Table* y *Vehicle Scheduling*, obteniendo el óptimo frente de Pareto. Esto es posible inclusive en un espacio de soluciones no convexo, tal como se observa en la **Figura 22**.

La parametrización del modelo ϵ -restringido se observa en la **Figura 23**. Al lado izquierdo es resumido el modelo bi-objetivo que se compone de las funciones objetivo para maximizar el nivel de servicio asociado al *Time Table* y minimizar el tamaño de la flota relacionado con *Vehicle Scheduling*. Este modelo contiene un bloque de restricciones relacionado con *Time Table*, otro enlazado con ambos problemas y un bloque final concerniente a *Vehicle Scheduling*.

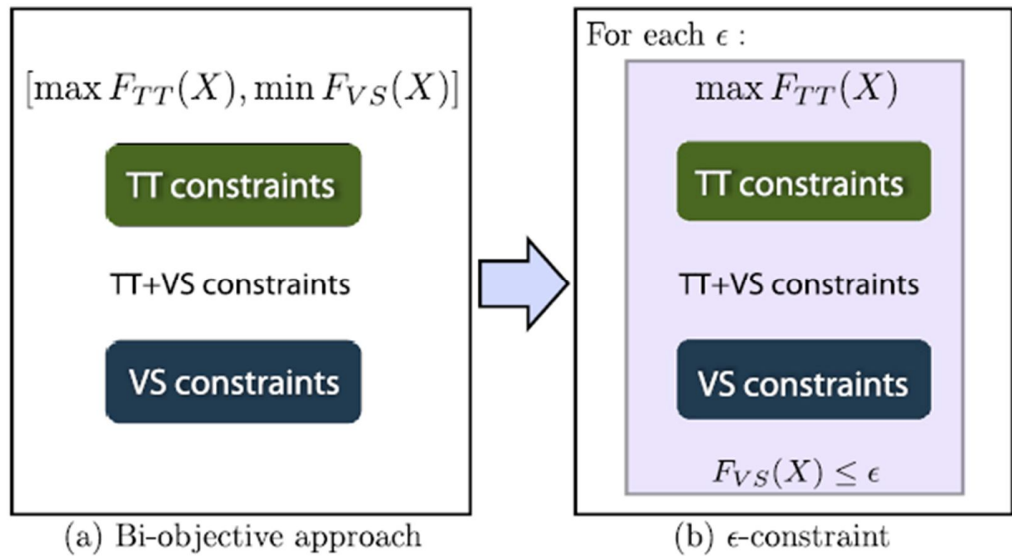
Figura 22. Representación Geométrica del modelo ϵ -restringido en el caso de una curva de Pareto no convexa



Fuente: Omar J. Ibarra-Rojas, Ricardo Giesen, Yasmin A. Rios-Solis

El lado derecho de la **Figura 23** muestra como la función objetivo de *Vehicle Scheduling* es parametrizada e insertada como una restricción.

Figura 23. Izquierda: Formulación del modelo bi-objetivo. Derecha: idea principal del método de solución ϵ -restringido



Fuente: Omar J. Ibarra-Rojas, Ricardo Giesen, Yasmin A. Rios-Solis

Estudio Experimental

Tomando como base información de planificadores de redes de tránsito, para definir los escenarios de estudio, los autores asumen lo siguiente: un nodo de sincronización por cada 10 líneas de buses; el número de pares de líneas para ser sincronizadas en cada nodo está entre 1 y 7; las líneas de buses inician y terminan en el mismo punto, por lo que no son requeridos viajes en vacío (*Deadhead*); cada día se divide en 6 periodos de planificación con datos específicos de demanda y tiempos de viaje; finalmente, las agencias están en la capacidad de definir los valores para la flexibilidad de los parámetros que satisfagan sus políticas de operación.

El tamaño de la red es determinado por el número de líneas $|I|$ y el número de nodos de transferencia $|B|$. Todas los tipos de instancias evaluadas tienen seis periodos de evaluación de 240 minutos cada uno. La frecuencia de las líneas es generada aleatoriamente entre 13 y 18 minutos; los tiempos de recorrido también se generan de forma aleatoria entre 80 y 150 minutos. Los nombres de las instancias y sus parámetros son resumidos en la **Tabla 17**.

En la **Tabla 18** se observa que el 40% de las instancias arrojan resultados con una única solución óptima. Por tanto, con un número fijo de vehículos *Time Table* puede ofrecer el nivel máximo de servicio. En estos casos, el beneficio de usar el modelo propuesto es obtener una solución para ambos problemas de manera integral, garantizando que los criterios de optimización sean alcanzados simultáneamente.

Tabla 17. Tipos de instancias y valores de los parámetros

Instances	T1	T2	T3	T4	T5	T6
$ I $	10	50	10	50	10	50
$ B $	1	5	1	5	1	5
$100 \frac{d}{h} \in$	[7.5,12.5]	[7.5,12.5]	[11.25,18.75]	[11.25,18.75]	[15,25]	[15,25]

Fuente: Omar J. Ibarra-Rojas, Ricardo Giesen, Yasmin A. Rios-Solis

Tabla 18. Resultados usando el algoritmo propuesto

	T1		T2		T3		T4		T5		T6	
	Time	PF	Time	PF	Time	PF	Time	PF	Time	PF	Time	PF
1	26.25	1	569.66	2	15.66	1	586.85	1	123.96	2	73093.8	5*
2	42.06	1	246.51	1	31.06	1	237.18	1	375.062	2	21313.9	2
3	28.52	1	384.69	2	28.71	1	1030.64	2	152	2	25493.9	3
4	49.65	1	381.59	1	88.93	2	508.43	2	304.99	3*	45338.4	3
5	319.30	2*	265.82	1	266.81	2*	990.71	2	139.33	1	25408.7	3
6	34.04	1	3957.69	3	36.74	1	1175.55	2	7484.51	2	33401.3	3
7	44.84	2	305.49	2	49.02	2	2307.14	3	186.30	1	25,420	3
8	42.49	1	1120.39	1	41.63	1	571.80	2	19035.7	2	23678.8	4
9	226.29	1	1851.18	3*	161.96	1	3848.58	5*	4080.64	2	45,109	3
10	14.60	1	1093.22	3	16.59	1	843.19	2	192.68	1	39750.3	4

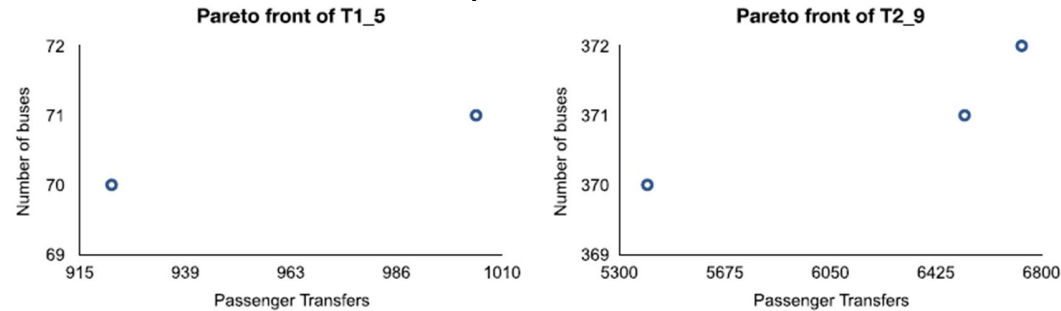
* The larger Pareto Front for the related instance type.

Fuente: Omar J. Ibarra-Rojas, Ricardo Giesen, Yasmin A. Rios-Solis

En las **Figura 24** a **Figura 26** se observan los frentes de Pareto de las instancias *T1* a *T6*, lo que resulta en una herramienta gráfica muy importante para el planificador de la operación, toda vez que puede observar con

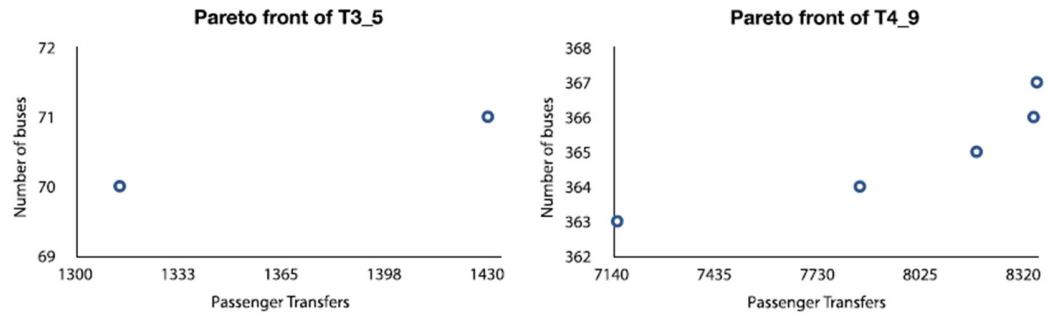
facilidad el provecho que puede sacar el uso de un autobús adicional en términos de pasajeros beneficiados con trasbordos a tiempo.

Figura 24. Frente de Pareto para instancias con menor flexibilidad en intervalos de paso



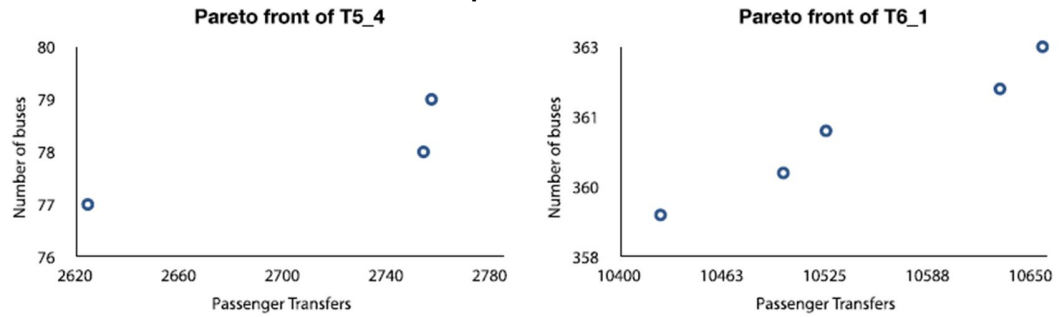
Fuente: Omar J. Ibarra-Rojas, Ricardo Giesen, Yasmin A. Rios-Solis

Figura 25. Frente de Pareto para instancias con flexibilidad en intervalos de paso entre 13,25 y 18,75



Fuente: Omar J. Ibarra-Rojas, Ricardo Giesen, Yasmin A. Rios-Solis

Figura 26. Frente de Pareto para instancias con mayor flexibilidad en intervalos de paso



Fuente: Omar J. Ibarra-Rojas, Ricardo Giesen, Yasmin A. Rios-Solis

Análisis del artículo

Tabla 19. Análisis del artículo: *An integrated approach for timetabling and vehicle scheduling problems to analyze the trade-off between level of service and operating costs of transit networks*

Propuesta del artículo	Propuesta de este trabajo
Resolución de los problemas <i>Time Table</i> y <i>Vehicle Scheduling</i> de forma simultánea y generando un frente de Pareto con soluciones óptimas que conserven el equilibrio entre nivel de servicio y costos operacionales.	Usar un Algoritmo Genético y un planteamiento similar al problema empaquetamiento en una dimensión, para desarrollar la tarea de <i>Vehicle Scheduling</i> para rutas alimentadoras del sistema de transporte Masivo Megabús.
La definición de los horarios de los despachos se hace de forma integral al resolver ambos problemas.	Se parte de los resultados del <i>Time Table</i> en la etapa anterior, sin considerar los desplazamientos de los horarios definidos en esa etapa.
Las rutas tienen un único lugar de partida y llegada por lo que no son requeridos los viajes en vacío entre terminales.	El diseño de red de rutas alimentadoras del sistema Megabús no considera que se presten servicios entre los tres terminales, es decir, cada ruta alimentadora del sistema Megabús tiene un único terminal de llegada.
Considera múltiples tipos de autobuses para la operación de las rutas, sin embargo, el modelo se resuelve para cada tipo de autobús de manera independiente.	Sólo se considera un tipo de autobús para la operación de las rutas alimentadoras. La flota se divide en dos grupos, uno de ellos presta el servicio de las rutas de los terminales mayor y menor (Cuenca Cuba). El segundo grupo a las rutas del terminal medio (Cuenca Dosquebradas). El problema se resuelve de forma independiente para cada grupo de rutas.
El problema se enfoca en la minimización de la flota, aunque puede incluir otros costos.	Se consideran los costos por el tamaño de la flota en operación, los tiempos de inactividad y la penalización por cambio de ruta.

Propuesta del artículo	Propuesta de este trabajo
El modelo propuesto encuentra múltiples soluciones óptimas y las presenta en un frente de Pareto que permite observar el equilibrio entre nivel de servicio y costos operacionales.	Con el Algoritmo Genético se encuentra una población de soluciones de buena calidad.
El artículo menciona la aplicación del modelo en sistemas de 10 y 50 rutas, con intervalo de paso entre 13 y 18 minutos y tiempos de ciclo de 80 a 150 minutos.	El trabajo se propone para el subsistema de rutas alimentadoras de Megabus, compuesto por 30 rutas con intervalos de paso entre 4 y 30 minutos y tiempos de ciclo entre 14 y 56 minutos.

Fuente. Elaboración propia

2.6 A VEHICLE SCHEDULING PROBLEM WITH FIXED TRIPS AND TIME LIMITATIONS.

(Eliyi et al., 2009) – ELSEVIER – Int. J. Production Economics 117 (2009) 150–161

Deniz Türsel Eliyi.

Arslan Ornek.

Izmir University of Economics, Izmir 35330, Turkey.

Sadık Serhat Karakütük.

Dokuz Eylül University, Izmir 35100, Turkey.

Abstract

Los autores proponen resolver el problema para diferentes tipos de vehículos, un conjunto conocido de viajes con demanda asociada y horarios que deben ser cumplidos con exactitud, al punto de no poder ser ejecutados en otro momento. Proponen modelar el problema análogamente a uno de *Tactical Fixed Job Scheduling (TFJS)*, con la salvedad de que en el problema a resolver existe una dependencia a la secuencia de los servicios y restricciones de capacidad de los autobuses. Además del modelo matemático proponen algunas soluciones Heurísticas para el problema.

Resumen

Los autores toman una situación de la vida real, con distintos factores que agregan dificultad al problema de programación de autobuses. En la organización de eventos deportivos hay diferentes tipos de vehículos con distintas capacidades y costos de operación, en los cuales deben trasladarse los participantes a los diferentes lugares en que se realizan las competencias y sitios de hospedaje. El conjunto de viajes de cada día tiene horarios de inicio y fin previamente establecidos, que deben ser cumplidos con exactitud, al punto de no poder ser ejecutados en horarios diferentes.

Para el caso de estudio, los autores definen como viaje a la acción de transportar pasajeros de un lugar a otro en un intervalo de tiempo definido. El número de viajes diarios es programado al finalizar el día anterior a su ejecución y no da cabida a ajustes en los horarios ni lugares ni son programados entre tres o más lugares.

Cada viaje j ($j \in \{1, 2, \dots, N\}$) tiene definidos un tiempo de inicio (r_j) y fin (d_j), que corresponden a las horas de despacho y arribo en los lugares entre los que se realiza el viaje, por lo tanto, para cada viaje se conoce su tiempo de

ejecución $p_j = d_j - r_j$. La demanda de cada viaje (D_j) , también es conocida y está asociada a cada viaje programado y de acuerdo a ésta se tienen dos tipos de viajes:

- Cuando los pasajeros pueden ser divididos para ser transportados en más de un autobús, debido a que la cantidad de personas excede la capacidad del mismo o cuando esto significa menor costo
- Cuando son programados para equipos competidores que deben ser transportados siempre en un solo grupo.

Para la restricción que impone el segundo tipo de viajes, se requiere asumir que la mayor demanda posible es igual o menor a la capacidad del vehículo de mayor tamaño, de lo contrario el problema resultaría infactible. El conjunto de viajes de este tipo es bien conocido y se denota como T .

La velocidad promedio de los vehículos se asume como constante, por lo que el tiempo de cada viaje es determinístico y bien conocido, al igual que el tiempo de alistamiento a_{jb} , considerado como el tiempo que le toma a un vehículo desplazarse del lugar de arribo del viaje j al lugar de despacho del viaje b , cuando le es asignado realizar un viaje b después de finalizar un viaje j .

Los vehículos son indexados como $i \in \{1, 2, \dots, I_1, I_1 + 1, 2, \dots, I_2, I_2 + 1, 2, \dots, I_k\}$, donde se tienen k tipos de vehículos. Cada vehículo i tiene definida una capacidad (c_i) cuyo límite es estricto, sin embargo, para asignar un viaje no todas las sillas del vehículo deben estar ocupadas.

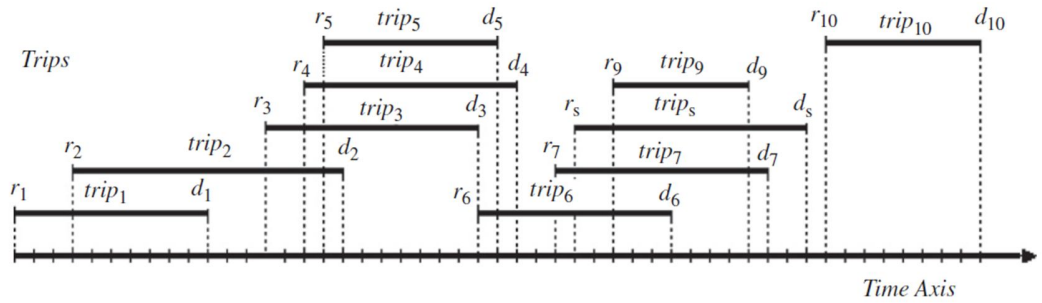
Cada vehículo tiene un costo fijo diario que depende de su capacidad. Una vez es asignado un vehículo para realizar un viaje, se incurre en el costo fijo y se obtiene el derecho para usarlo durante un periodo de tiempo permitido (S) para el día en que se ejecuta la programación. Este periodo de tiempo limitado es igual para todos los vehículos.

Si el vehículo es programado más allá de S se incurre en un costo variable (v_i) por unidad de tiempo de sobreuso (o_i) . Cada vehículo tiene un tiempo máximo de sobreuso O por cada día, por lo que un autobús puede ser usado diariamente un tiempo máximo $S + O$.

Los viajes que no pueden ser ejecutados por el mismo vehículo que realiza el viaje j forman un conjunto de incompatibilidad (Q'_j) . En la **Figura 27** se observan de forma gráfica las tres posibles causas para que dos viajes no puedan ser ejecutados por el mismo vehículo. Las mismas se listan a continuación:

- Viajes traslapados, es decir, que parte del tiempo de ejecución sea el mismo para los dos viajes (*Trip 1 y Trip 2*).
- Cuando el tiempo de alistamiento no es suficiente para que el vehículo esté a tiempo para la hora de despacho del segundo viaje (*Trip 3 y Trip 4*).
- Cuando el tiempo transcurrido entre el inicio del primer servicio y el fin del último servicio propuestos para el vehículo es mayor al tiempo regular permitido más el tiempo de sobreuso (*Trip 1 y Trip 5*).

Figura 27. Conjunto de incompatibilidad



Fuente: Deniz Türsel Eliyi, Arslan Ornek, Sadık Serhat Karakütük

Tomando como base las condiciones expuestas, los autores definen el conjunto de incompatibilidad como:

$$Q'_j = \left\{ \begin{array}{l} b \in \{1, \dots, N\}: r_j \leq r_b \leq d_j + a_{jb} \\ \text{or} \\ r_b + p_b - r_j > S + O \\ \text{or} \\ r_j \leq r_b \leq r_b \end{array} \right\} \quad (40)$$

Las variables de decisión son:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si el vehículo } i \text{ toma el viaje } j \\ 0 & \text{En los demás casos} \end{cases} \quad (41)$$

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{si el vehículo } i \text{ es usado} \\ 0 & \text{En los demás casos} \end{cases} \quad (42)$$

$$o_i : \text{sobreuso del vehículo } i \quad (43)$$

La formulación matemática del problema es la siguiente:

$$\min z = \sum_{i=1}^{jk} (f_i y_i + v_i o_i) \quad (44)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^{I_k} c_i x_{ij} \geq D_j, \quad \forall j \quad (45)$$

$$x_{ij} + x_{ib} \leq 1, \quad \forall i, j \text{ y } b \in Q'_j \quad (46)$$

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} \leq M y_i, \quad \forall i \quad (47)$$

$$(r_b + p_b) x_{ib} - r_j x_{ij} \leq S + o_i + (1 - x_{ij}) P, \quad \forall i, j, \text{ y } b \notin Q'_j \quad (48)$$

$$\sum_{i=1}^{I_k} x_{ij} = 1, \quad \forall j \in T \quad (49)$$

$$x_{ij}, y_i \text{ binarias } \forall i, j \text{ y } o_i \geq 0, \quad \forall i \quad (50)$$

Si bien, la formulación matemática del modelo es similar a la del problema *TSFJ*, diferencias como la inclusión de demanda mayor a uno y la opción de uso adicional de los autobuses hacen de éste un modelo mucho más complejo.

Los autores logran encontrar soluciones óptimas en tiempos razonables para programación de servicios con 20 viajes al día, sin embargo, en el problema real pueden encontrarse programaciones de hasta 100 viajes diarios. Por esta razón, los autores proponen tres técnicas heurísticas con las que pueden obtener buenas soluciones rápidamente.

La primera heurística que proponen se basa en la asignación de los vehículos. Se ordenan los viajes ascendentemente de acuerdo a su hora de salida y se toma el primero de ellos para asignarlo al vehículo que cumpla con las condiciones de capacidad. En adelante se continúa la asignación de servicios al mismo autobús cuidando de no superar el tiempo máximo permitido por día. Una vez finalizada la asignación, se repite el proceso hasta haber asignado todos los viajes programados.

La segunda heurística es basada en los viajes. De nuevo son ordenados cronológicamente de acuerdo a la hora de salida y se toma el primero de ellos, sin embargo, ahora son asignados todos los vehículos que sean requeridos para realizar este viaje (*en los casos en que los viajes deben ser divididos porque se excede la capacidad de los autobuses*). El ejercicio se repite para cada servicio dando prioridad a los autobuses que ya tienen viajes asignados, es decir, los vehículos por los cuales se asumió el costo fijo.

La tercera heurística divide los viajes en dos grupos, de acuerdo a los tipos de demanda definidos previamente, para luego generar subgrupos según la cantidad de pasajeros por viaje. El objetivo es asignar los vehículos de acuerdo a la capacidad de los autobuses.

Para cada heurística se hace una variación considerando el tiempo fijo más el tiempo de sobreuso. De esta forma, los autores presentan seis técnicas heurísticas para resolver el problema.

Análisis del artículo

Tabla 20. Análisis del artículo: *A vehicle scheduling problem with fixed trips and time limitations.*

Propuesta del artículo	Propuesta de este trabajo
Propone una solución para el problema de Vehicle Scheduling para una programación de viajes en eventos deportivos.	Usar un Algoritmo Genético y un planteamiento similar al problema empaquetamiento en una dimensión, para desarrollar la tarea de <i>Vehicle Scheduling</i> para rutas alimentadoras del sistema de transporte Masivo Megabús.
La programación de viajes no admite cambios y debe ser ejecutada al 100%.	Se parte de una programación de servicios ya definida.
El problema no considera rutas urbanas, sino recorridos programados de un punto a otro.	Se resuelve el problema para las rutas alimentadoras del SITM Megabús.
Cada viaje tiene un lugar de origen y destino, horas de inicio y fin y cantidad de viajeros asociados.	No existe una demanda asociada a cada servicio, sino que se cuenta con los horarios de despacho definidos previamente y para los cuales se consideró el comportamiento típico de la demanda.

Propuesta del artículo	Propuesta de este trabajo
Considera múltiples tipos de autobuses para la operación de las rutas.	Sólo se considera un tipo de autobús para la operación de las rutas alimentadoras.
Dado el alto costo computacional del modelo matemático, se proponen tres técnicas heurísticas que permiten obtener buenas soluciones rápidamente.	Se usa un Algoritmo Genético para resolver el problema formulado de manera similar a uno de empaquetamiento en una dimensión.
El artículo menciona que el problema real puede tener hasta 100 viajes diarios.	Las rutas alimentadoras del SITM tienen más de 3000 servicios al día.
Los viajes tienen restricciones relacionadas con los tiempos de ejecución, alistamiento y duración del turno.	Se considera la restricción del tiempo de ejecución, sin embargo no se tienen limitantes respecto a los tiempos de alistamiento y duración de la operación del autobús.
El problema propuesto presenta condiciones distintas a las de las rutas de transporte urbano, sin embargo, se consideran algunas condiciones y características comunes con el transporte público.	

Fuente. Elaboración propia

2.7 ITERATED LOCAL SEARCH FOR THE MULTIPLE DEPOT VEHICLE SCHEDULING PROBLEM

(Laurent and Hao, 2009) – ELSEVIER – Computers & Industrial Engineering 57 (2009) 277–286

Benoît Laurent.

*erinfo SA, 41 Avenue Jean Jaurès, 67100 Strasbourg, France
LERIA, Université d'Angers, 2 Boulevard Lavoisier, 49045 Angers Cedex 01, France.*

Jin-Kao Hao.

LERIA, Université d'Angers, 2 Boulevard Lavoisier, 49045 Angers Cedex 01, France.

Abstract

Los autores presentan una solución para el problema de programación de autobuses con múltiples depósitos, basados en un algoritmo *Iterated Local Search (ILS)* e incorporando un método de movimiento de bloques para explorar el espacio de soluciones, que opera en cuatro pasos: selección del bloque, movimiento del mismo, identificación de conflictos y correcciones para garantizar una solución factible.

Resumen

Los autores presentan una técnica metaheurística para resolver el problema de *Vehicle Scheduling*. A través de un *Iterated Local Search (ILS)* y un esquema de movimiento de bloques pretende pasar buenas características de una solución a otras soluciones. También presentan como fortaleza de su propuesta la construcción de la programación inicial con un eficiente algoritmo de subasta y la integración de mecanismos de perturbación que guían la búsqueda con funciones de diversificación controlada.

Las entradas del problema a resolver son los viajes, vehículos, patios y recorridos no comerciales. Los primeros tienen lugares de origen y destino relacionados con horarios de salida y llegada, entre los cuales se debe realizar un recorrido transportando usuarios que requieren del servicio. Cada viaje debe ser ejecutado por un solo vehículo, que cuente con el tiempo necesario para el alistamiento antes de ejecutar el siguiente.

Los vehículos considerados en el problema tienen la misma capacidad y pertenecen a un patio de capacidad limitada, desde los cuales salen los autobuses al inicio de la operación y al cual deben retornar al final de la misma. El problema propuesto considera múltiples patios. Los recorridos no comerciales se refieren a los desplazamientos desde y hacia los patios para el comienzo y fin de la operación.

Los autores formulan cuatro restricciones generales que deben ser satisfechas para encontrar una solución válida:

1. Todos los viajes deben ser ejecutados, asignando cada uno a un único autobús.
2. La secuencia de los viajes asignados a los autobuses debe ser posible de realizar, es decir, un autobús no debe tener asignados dos viajes distintos con horas iguales.
3. Los vehículos deben regresar al patio desde donde salieron originalmente.
4. Los patios tienen una capacidad que no puede ser excedida.

Las restricciones (1), (3) y (4) son satisfechas por construcción del modelo, sin embargo, la restricción relacionada con la factibilidad de la asignación de viajes si es considerada en el procedimiento de solución.

En cuanto a la función objetivo se busca minimizar el costo fijo por uso de cada autobús y el costo operacional relacionado con los recorridos no comerciales.

La idea general del ILS es explorar el espacio local en búsqueda de soluciones mejores respecto a una vecindad inicial. La estructura de este algoritmo requiere de la generación de una solución inicial, un operador de perturbación, un procedimiento de búsqueda local y un criterio de aceptación que determina a cual solución se aplica la siguiente perturbación.

Para la construcción de la solución inicial los autores reemplazan los diferentes patios por uno ficticio, al que le asignan el costo de recorridos iniciales y finales más bajo del problema original. Para la solución del problema simplificado implementan un eficiente algoritmo que produce rápidamente soluciones factibles.

La primera fase del algoritmo garantiza encontrar el menor número de vehículos requeridos para cubrir todos los viajes. La segunda fase asigna los viajes a los vehículos considerando los costos por recorridos no comerciales. La tercera fase resuelve el problema de un solo patio para todos los patios del problema original.

Junto al método de generación de soluciones vecinas propuesto por los autores, se analizan otros dos existentes, buscando identificar las ventajas de la nueva estrategia. Los métodos existentes analizados son el de trasladar servicios asignados a un vehículo a otro y el de intercambiar servicios asignados en dos vehículos diferentes.

El método propuesto por los autores se basa en una forma de eyección de cadenas que permite explorar el espacio de soluciones más extensa y efectivamente. Se inicia con la selección de un conjunto de elementos a los que se les cambiará su estado, y que permiten identificar otros conjuntos de los que al menos un elemento deberá cambiar su estado.

El movimiento de bloques, como lo llaman los autores, consiste en el desplazamiento de bloques de viajes consecutivos asignados a un mismo vehículo hacia otro vehículo. El bloque es seleccionado de forma aleatoria y su desplazamiento implica la violación de restricciones que deben ser reparadas en el mismo procedimiento. En caso de no conseguir satisfacer las

restricciones, como último recurso el viaje en conflicto será asignado a un nuevo autobús o cancelado el movimiento del bloque. En la

Figura 28 se ilustra un ejemplo de movimiento de bloques, en el cual de una solución inicial se selecciona aleatoriamente un bloque del vehículo 3. Mover el bloque al vehículo 1 causa conflictos que son resueltos al mover los viajes involucrados a los vehículos 2 y 3.

El movimiento de bloques ofrece dos importantes ventajas: i) previene que la búsqueda se estanque en óptimos locales debido a la reparación de algunos conflictos que puedan presentarse y ii) se preservan las buenas propiedades de la configuración original, especialmente en aquellos viajes que encajan perfectamente juntos.

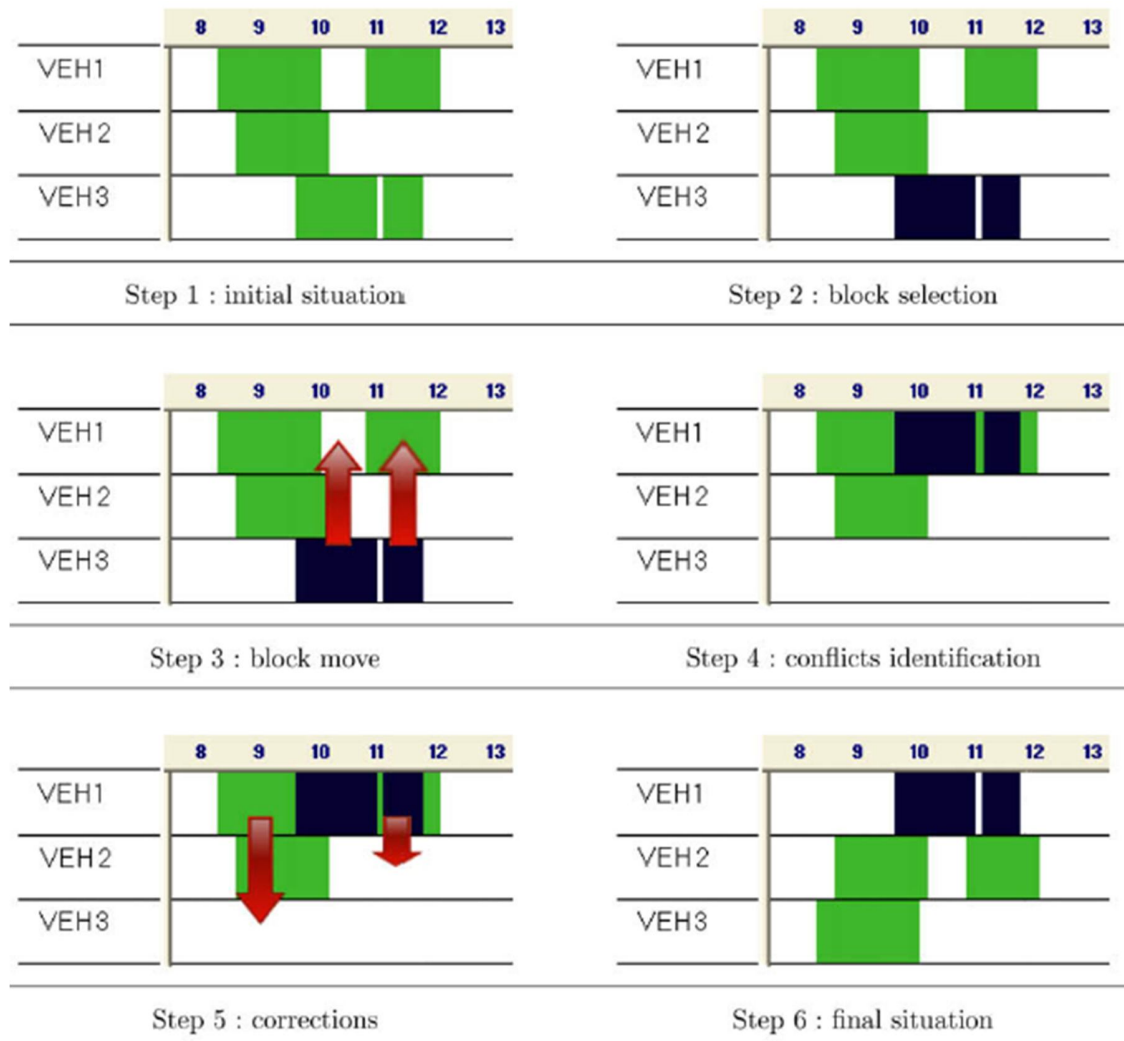
La solución es aceptada si el costo es menor o igual al de la solución original, lo que hace de este un algoritmo rápidamente descendente que busca en todas las soluciones vecinas a la configuración actual, aquella que ofrezca mayor reducción del costo.

Para escapar de óptimos locales y explorar nuevas soluciones se aplican perturbaciones al mínimo local, cuidando de que no sea tan fuerte que se convierta en un proceso aleatorio con baja probabilidad de encontrar mejores soluciones, ni tan débil que se mantenga en la región del mínimo local original y termine regresando a éste.

Los operadores de perturbación propuestos consisten en: i) Ejecutar movimientos sin importar los resultados de su evaluación en la función objetivo, siempre y cuando no incrementen la flota necesaria para la operación; ii) Desasignar los viajes a los vehículos de un patio en particular y hacer una reasignación de los mismos.

Los autores comparan los resultados de su propuesta con otros modelos encontrando importantes ventajas en la calidad y velocidad de convergencia.

Figura 28. Ejemplo de movimiento de bloque con correcciones



Fuente: Benoît Laurent, Jin-Kao Hao.

Análisis del artículo

Tabla 21. Análisis del artículo: *Iterated local search for the multiple depot vehicle scheduling problem.*

Propuesta del artículo	Propuesta de este trabajo
Resuelve el problema de Vehicle Scheduling con un algoritmo Iterative Local Search incorporando un esquema de búsqueda de vecinos basada en movimiento de bloques de servicios.	Usar un Algoritmo Genético y un planteamiento similar al problema empaquetamiento en una dimensión, para desarrollar la tarea de Vehicle Scheduling para rutas alimentadoras del sistema de transporte Masivo Megabús.
Con la técnica de movimiento de bloques se conservan las buenas propiedades de secciones de programación con servicios que encajan muy bien. Sin embargo, se generan conflictos de factibilidad que deben ser corregidos en el proceso.	La codificación del problema y el AG se basan en la permutación de servicios de manera individual. El algoritmo de empaquetamiento garantiza que se satisfacen todas las posibles restricciones por cruce de los tiempos de los servicios.
Se considera un solo tipo de autobús y múltiples patios	Se considera un solo tipo de autobús y un solo patio.
La función objetivo considera los costos por uso de flota y recorridos no comerciales (entrada y salida de patios).	Se consideran costos por uso de flota, tiempos de inactividad y una penalización por cambio de ruta.
Por construcción del modelo son resueltas las restricciones de asignación de todos los viajes y de asignación y capacidad de los patios.	Por construcción del modelo son resueltas las restricciones de asignación de todos los viajes sin que se superpongan los asignados al mismo autobús.
En el desarrollo del algoritmo se debe garantizar que los viajes asignados a un autobús no se superpongan.	El AG explora un espacio de soluciones factible.
El algoritmo es probado en escenarios de programación de servicios con 500, 1000 y 1500 viajes.	Las rutas alimentadoras del sistema Megabús se dividen en dos cuencas con aproximadamente 1200 y 1800 servicios programados en cada una.

Fuente. Elaboración propia

2.8 TRANSIT NETWORK TIMETABLING AND VEHICLE ASSIGNMENT FOR REGULATING AUTHORITIES

(Guihaire and Hao, 2010) - ELSEVIER – Computers & Industrial Engineering 59 (2010) 16–23

Valérie Guihaire.

Perinfo SA, 1 rue de Metzeral 67100 Strasbourg, France

LERIA, Université d'Angers, 2 Boulevard Lavoisier, 49045 Angers Cedex 01, France.

Jin-Kao Hao.

LERIA, Université d'Angers, 2 Boulevard Lavoisier, 49045 Angers Cedex 01, France.

Abstract

Los autores buscan combinar características de las actividades de Time Table y Vehicle Scheduling y proponen una solución óptima considerando de forma simultánea los objetivos de cada etapa. Se consideran objetivos de cantidad y calidad de transferencias, regularidad de intervalos de paso, tamaño de flota y desplazamientos en vacío. El procedimiento de optimización es basado en búsqueda local iterativa ((ILS) Iterated Local Search) obteniendo mejoras en cuanto a calidad del servicio y uso eficiente de recursos frente a los procedimientos habituales una red de rutas existente.

Resumen

Para una red de rutas predefinida, que incluye paraderos, horarios de despacho, puntos de transferencia, tiempos de ciclo e intervalos dependientes de la hora del día y niveles de importancia en las transferencias, los autores proponen definir la programación de servicios sincronizada para mejorar las transferencias y la asignación de vehículos a la misma, satisfaciendo las restricciones impuestas y buscando cumplir con objetivos de eficiencia y calidad del servicio.

Los resultados a obtener son la programación de servicios, tamaño de la flota en operación y la asignación de servicios a los vehículos. Se presenta cada servicio de las tablas horarias como una variable de decisión cuyo valor es el par (*hora de inicio de servicio, vehículo que lo ejecuta*). También se consideran otras variables relacionadas con los tiempos de transferencia y los intervalos de paso regulares.

Los dos primeros objetivos apuntan a la calidad del servicio, el primero es el número y calidad de las transferencias posibles a través de la minimización de los tiempos de espera para realizar transbordos en toda la red de rutas. El segundo objetivo es mantener intervalos regulares calculados a partir de las horas de llegada a los principales paraderos y terminales de intercambio.

El tercer y cuarto objetivos están enfocados en el uso de los recursos como la flota y los servicios en vacío por fuera de operación, buscando minimizar los costos asociados a estas variables.

Los autores basan su solución en una búsqueda local iterativa (ILS, Iterated Local Search), en cada iteración la programación de servicios es ajustada y la asignación óptima de vehículos recalculada.

Se parte de una solución inicial construida en dos fases usando un modelo de cuasi-asignación lineal, que primero asigna una hora de despacho a los servicios de cada ruta de la red, basándose en la programación existente. Luego asigna un vehículo a cada servicio corriendo un algoritmo que enlaza los viajes dependiendo de la factibilidad de la conexión, kilómetros por viajes en vacío y un peso asignado a este objetivo.

El ILS se basa en la definición de dos tipos de métodos para la búsqueda en el espacio de soluciones, alternando intensidad y diversidad en la ejecución del algoritmo.

Análisis del artículo

Tabla 22. Análisis del artículo: *Transit Network Timetabling And Vehicle Assignment For Regulating Authorities.*

Propuesta del artículo	Propuesta de este trabajo
Resolución de los problemas <i>Time Table</i> y <i>Vehicle Scheduling</i> de forma simultánea con un algoritmo ILS, buscando sincronización e intervalos regulares para la primera y minimización de flota y kilómetros no comerciales para la segunda.	Usar un Algoritmo Genético y un planteamiento similar al problema empaquetamiento en una dimensión, para desarrollar la tarea de Vehicle Scheduling para rutas alimentadoras del sistema de transporte Masivo Megabús.
El modelo busca sincronizar las horas de llegada y despacho de los servicios en las principales paradas, buscando minimizar los tiempos requeridos para el trasbordo de los usuarios.	No se considera el ajuste de la programación de servicios. Se parte del principio de que la programación de servicios cubre de manera eficiente las necesidades de la demanda de

Propuesta del artículo	Propuesta de este trabajo
Busca también mantener intervalos regulares, considerando un margen de acuerdo a lo esperado para cada periodo del día.	usuarios.
El algoritmo ILS en cada iteración ajusta la programación de servicios y recalcula la asignación óptima de los vehículos.	El AG explora un espacio de soluciones factible, a partir de una programación de servicios fija que se tiene como insumo.
Se busca la minimización de los costos fijos por uso de la flota y por los Kilometrajes recorridos durante la ejecución de servicios en vacío.	Se consideran costos por uso de flota, tiempos de inactividad y una penalización por cambio de ruta.

Fuente. Elaboración propia

3 FORMULACIÓN GENERAL DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Las diferentes actividades que realiza una persona en su vida cotidiana, hacen necesario que deba desplazarse de un lugar a otro para lograr llevarlas a cabo, generando un problema directamente relacionado con la distribución de las tareas en los distintos sectores de una ciudad o población y la forma de transportarse.

El transporte público surge como una alternativa para movilizar gran parte de la población de un lugar a otro, siendo un medio que, frente al transporte privado, da mejor uso a recursos como los vehículos y la infraestructura vial, aportando en el desarrollo social y preservación del medio ambiente.

En la prestación de servicio de transporte público confluyen gran cantidad de elementos que impactan en la forma de operar y administrar un sistema de este tipo, sin embargo, resaltan 3 variables indispensables para que exista un sistema de transporte público operado con autobuses.

- Los usuarios que requieren del servicio.
- Los vehículos para transportar los usuarios.
- Los conductores para conducir los vehículos.

La planeación de transporte es un proceso en el cual se definen los elementos estructurales de un sistema de transporte público, considerando los factores externos e internos que impactan en él. Este proceso requiere de toma de decisiones complejas, en las que se tienen múltiples objetivos, restricciones, incertidumbres, factores no cuantificables, grandes inversiones de capital y compromisos de largo plazo (Laporte et al., 2000).

De otra parte, la planeación de la operación de un sistema de transporte es realizada para el día a día, buscando satisfacer las necesidades de desplazamientos de los usuarios a través del uso eficiente de los recursos. Es un proceso que tiene objetivos diferentes en cada una de sus etapas y un objetivo general de reducir costos garantizando el servicio mínimo requerido para mejorar la movilidad de una ciudad o población.

Autores como (Ceder, 2007), proponen 4 etapas para la planeación de la operación de un sistema de transporte:

- 1) Diseño de red de rutas.
- 2) Generación de tablas horarias.
- 3) Programación de vehículos.
- 4) Programación de conductores.

La primera y segunda etapas del proceso buscan satisfacer las necesidades de cobertura espacial y frecuencia del servicio, considerando los lugares en que se originan y finalizan los viajes, como también la cantidad de viajes realizados desde cada sector en cada hora del día. En estas etapas se diseña la red de rutas y se define la frecuencia de paso para cada una de ellas.

La tercera y cuarta etapas definen la programación de vehículos y conductores para cumplir con los servicios programados para un conjunto de rutas. De esta forma, se entiende que en las etapas finales del proceso se busca optimizar los recursos para la prestación del servicio previamente definido en las primeras según las necesidades de los usuarios.

La definición de los horarios en que se despacha cada servicio de cada ruta, es el resultado de la segunda etapa de la planeación de la operación de un sistema de transporte público, que parte de una red de rutas previamente definida en la primera etapa del mismo proceso. En este caso se considera la variabilidad de la demanda, que no sólo se observa a lo largo de una jornada de operación, sino también entre los diferentes tipos de día de la semana (días hábiles, sábado y domingo). También son tenidas en cuenta variables como la longitud de la ruta, el tiempo de ciclo, la velocidad, tipología vehicular y capacidad de los vehículos, entre otras.

En la tercera etapa del proceso es necesario definir la forma en que el parque automotor destinado a la operación debe ejecutar la totalidad de los servicios planificados, teniendo como principio que éstos ya satisfacen de forma óptima las necesidades de viaje de los usuarios. En este sentido, la asignación del recurso de flota a la prestación del servicio haciendo un uso eficiente de la misma, es el objetivo principal de esta etapa.

Los vehículos representan grandes inversiones de parte de las empresas responsables de la operación, por lo que la estimación equivocada del tamaño de la flota puede representar deficiencia en la prestación del servicio o altos costos que imposibiliten la sostenibilidad financiera del sistema.

Megabús es el Sistema Integrado de Transporte Masivo del Área Metropolitana de Centro Occidente, que opera desde el año 2006 en Pereira y Dosquebradas, dos de los tres municipios que conforman esta región de 622 mil habitantes en las cabeceras municipales¹. Actualmente es parte importante de la movilidad de la región y eje estructural del proyecto de implementación de una Sistema Integrado de Transporte Público que tendrá cobertura del 100% de la demanda de transporte público.

¹ Proyecciones DANE para el año 2016.

Es un sistema estructurado sobre corredores troncales con carriles exclusivos para autobuses de alta capacidad, que transportan a los usuarios desde los orígenes o hacia los destinos de mayor concentración de demanda. La red de rutas troncales se complementa con rutas alimentadoras operadas con autobuses de baja capacidad sobre carriles de tráfico mixto, ofreciendo cobertura en zonas de menor concentración de demanda.

Para ambos tipos de rutas, la definición de las tablas horarias y la programación de los autobuses están estrechamente relacionadas en un procedimiento único que satisface los requerimientos de frecuencia, velocidad operacional y flota requerida de acuerdo a las condiciones de cada ruta, pero que adopta una condición de ajuste entre intervalo de paso y tiempo de ciclo que genera ineficiencias en la operación. Adicionalmente, no se cuenta con una herramienta que automatice la tarea, siendo necesaria la dedicación de profesionales con experiencia durante varios días para cada actualización o ajuste de programación.

En este sentido, la búsqueda de una herramienta de solución que permita obtener programaciones más eficientes y en menor tiempo al requerido con el proceso actual, surge como una necesidad para el sistema Megabus. El uso de Algoritmos Genéticos, además de automatizar la tarea de programación de autobuses, puede encontrar soluciones muy eficientes en tiempos más cortos a los que toma el proceso actual.

4 OBJETIVOS DEL TRABAJO

4.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una herramienta que a partir de una programación de despachos ya definida, permita optimizar el proceso de programación y asignación de itinerarios a los autobuses (*Vehicle Scheduling*) en rutas alimentadoras del sistema de transporte masivo Megabus, a la vez que al sistematizarlo facilita y acelera su ejecución.

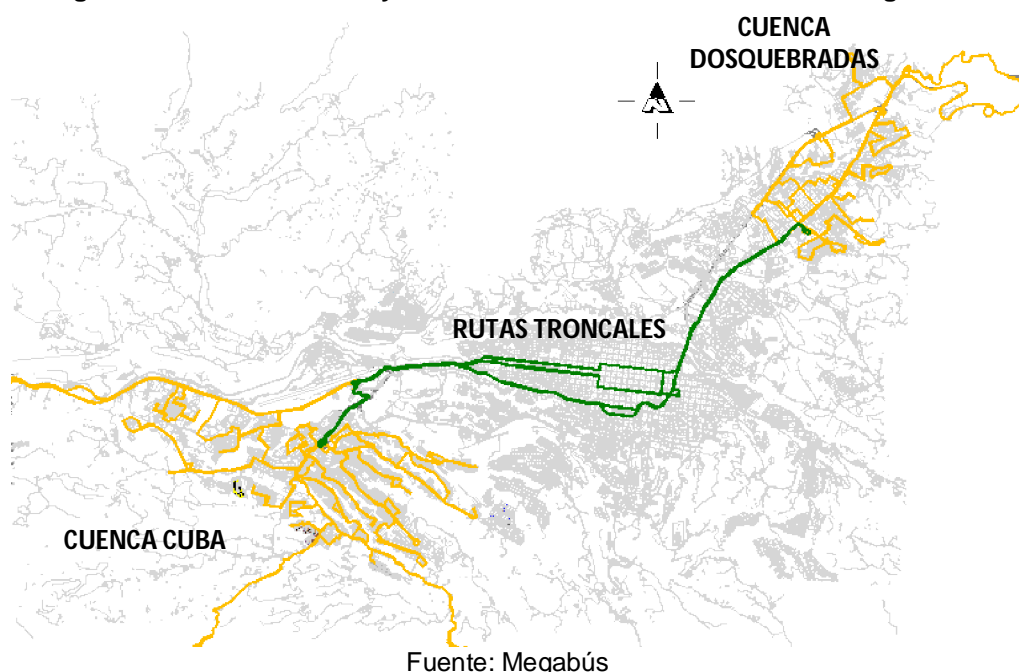
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar y analizar los procedimientos actuales bajos los cuales se desarrolla la programación y asignación de vehículos para la operación de las rutas alimentadoras del Sistema Integrado de Transporte Masivo Megabus.
- Desarrollar la herramienta de solución aplicada a la programación y asignación de vehículos para las rutas alimentadoras del SITM Megabús, a partir de una programación de despachos por ruta previamente establecida.
- Realizar un análisis comparativo entre la solución encontrada bajo el método propuesto y desarrollado en el proyecto, con la solución que actualmente se ejecuta en el SITM Megabús.
- Establecer las limitaciones del trabajo, junto con las recomendaciones y propuestas de investigación para el desarrollo de futuros trabajos de grado orientados a complementar y profundizar en el tema.

5 DESCRIPCIÓN DEL SITM MEGABÚS

El SITM Megabús está compuesto por dos cuencas de rutas alimentadoras, que son atendidas con autobuses de baja capacidad (40 pasajeros) y dan cobertura en barrios y zonas con baja concentración de demanda. Ambas cuencas están unidas a través de rutas troncales, que permiten la continuidad del viaje de los usuarios por corredores principales con autobuses de alta capacidad, tal como puede observarse en la **Figura 29**.

Figura 29. Rutas troncales y cuencas alimentadoras del sistema Megabús.



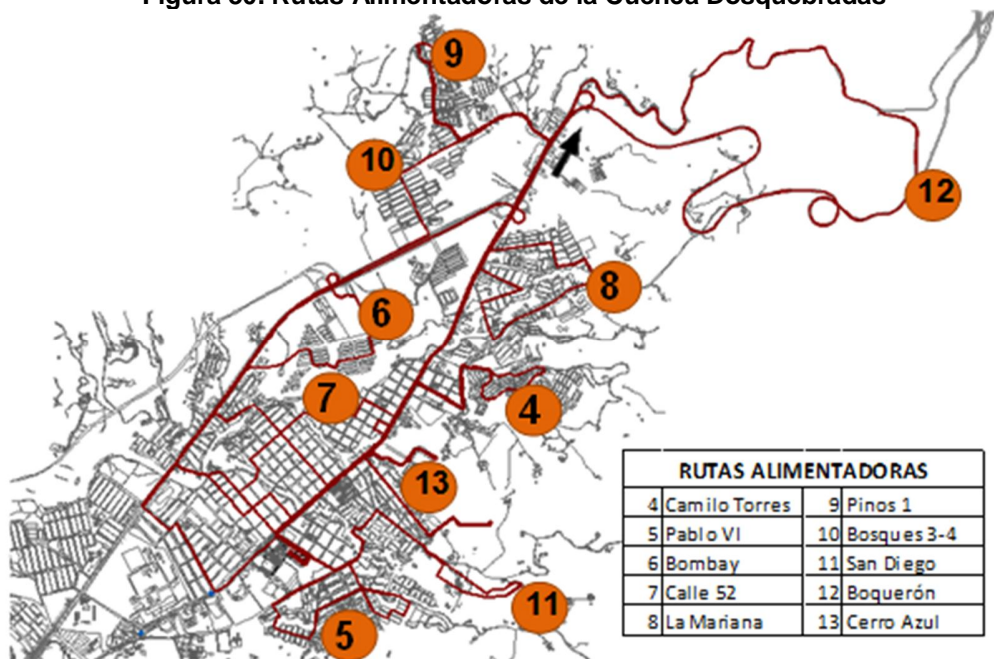
Cada ruta alimentadora tiene un recorrido definido entre un punto extremo en un barrio y un intercambiador (portal de intercambio), donde se conectan con las rutas troncales. Para las rutas alimentadoras, no se permite que un mismo autobús cumpla servicios en ambas cuencas, sin embargo, si es posible que el autobús cambie su operación de una ruta a otra si ambas pertenecen a la misma cuenca.

Las rutas alimentadoras tienen características de operación muy heterogéneas, es decir, las longitudes, frecuencias, demanda, velocidades de operación y demás condiciones cambian sustancialmente entre una y otra ruta.

En el caso de la cuenca Dosquebradas, tiene 10 rutas alimentadoras con longitudes desde 2,7 Km hasta 13,48 Km y tiempos de ciclo desde 12 minutos hasta 33 minutos. De igual forma, la frecuencia de paso de cada ruta responde a

la demanda de usuarios y puede ser desde 5 a 10 servicios a la hora. La interacción de todos estos aspectos lleva a definir la flota asignada en cada ruta, que puede variar desde 1 hasta 6 autobuses. En la **Figura 30** se observan las rutas alimentadoras de la cuenca Dosquebradas.

Figura 30. Rutas Alimentadoras de la Cuenca Dosquebradas



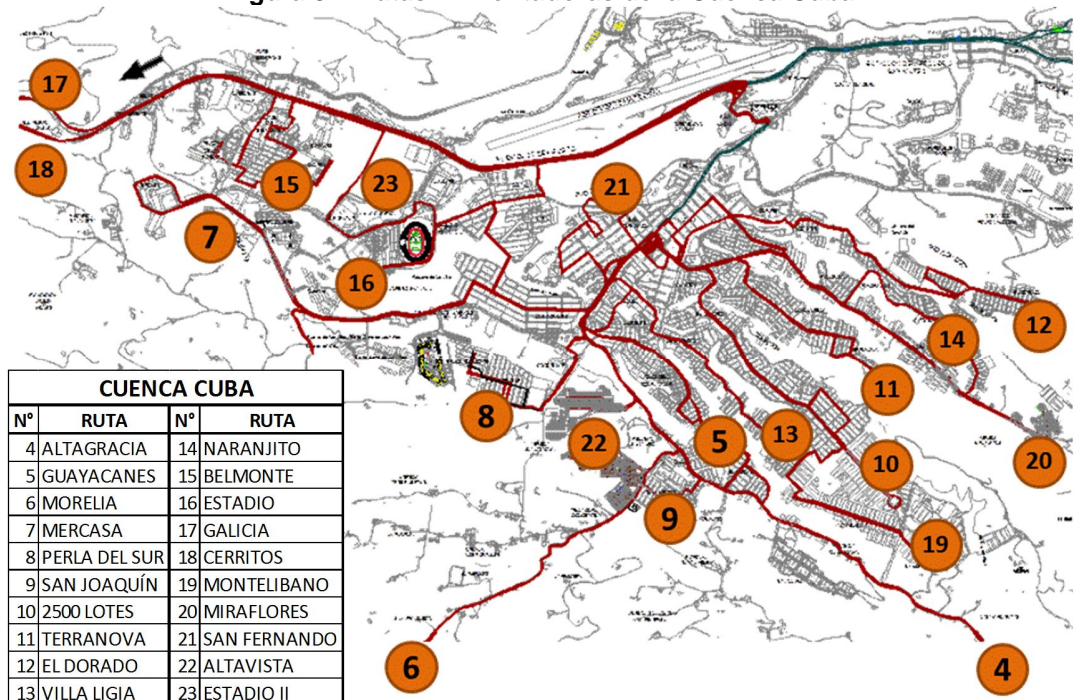
Fuente. Megabus

En el caso de la cuenca Cuba, tiene operación en dos estaciones de intercambio en los cuales se distribuyen las 20 rutas alimentadoras, 16 operan en el intercambiador de Cuba y las 4 restantes en la estación El Viajero. Las rutas de esta cuenca tienen longitudes desde 3,52 Km hasta 32,37 Km y tiempos de ciclo desde 15 minutos hasta 55 minutos. De igual forma, la frecuencia de paso de cada ruta responde a la demanda de usuarios y puede ser desde 4 a 15 servicios a la hora. La interacción de todos estos aspectos lleva a definir la flota asignada en cada ruta, que puede variar desde 1 hasta 6 autobuses. En la

Figura 31 se observan las rutas alimentadoras de la cuenca Cuba.

Actualmente, la programación de servicios y autobuses se hace para cada ruta del sistema sin considerar la interacción con las demás, lo que indica que la programación de servicios y autobuses para las rutas alimentadoras implica llevar a cabo 30 veces (una vez por ruta) el proceso definido para tal fin.

Figura 31. Rutas Alimentadoras de la Cuenca Cuba



Fuente. Megabus

6 PLANTEAMIENTO DE LA PROGRAMACIÓN ACTUAL

En la teoría, la programación de los servicios debe ser resuelta para cada ruta dando como resultado la definición de los horarios de despachos para atender la demanda. Estos servicios, agrupados por cuencas o grupos de rutas, son el insumo principal de la etapa de programación de autobuses que sería ejecutado de forma independiente para cada grupo que se forme, es decir, la programación de autobuses debería realizarse una vez por cada cuenca.

La programación de autobuses debe satisfacer condiciones preestablecidas desde la programación de servicios, como lo son: i) garantizar la ejecución de los servicios programados para todas las rutas, ii) considerar los tiempos de inicio y fin de cada servicio, iii) considerar diferentes tiempos de ciclo (tiempo final menos el inicial) que es una característica de cada ruta según su longitud y los tipos de vía por donde transita, iv) considerar diferentes intervalos de paso (tiempo entre el paso de dos buses de una misma ruta) para cada ruta y periodo del día, entre otros.

A su vez, la programación de servicios considera aspectos como la demanda y la capacidad de los autobuses, sin embargo, los resultados obtenidos pueden darse de dos maneras distintas que tienen impacto directo en la siguiente etapa del proceso de planeación: i) una que considera que el tiempo de ciclo sea un múltiplo exacto del intervalo de paso y ii) la otra cuando el tiempo de ciclo no es múltiplo exacto del intervalo de paso.

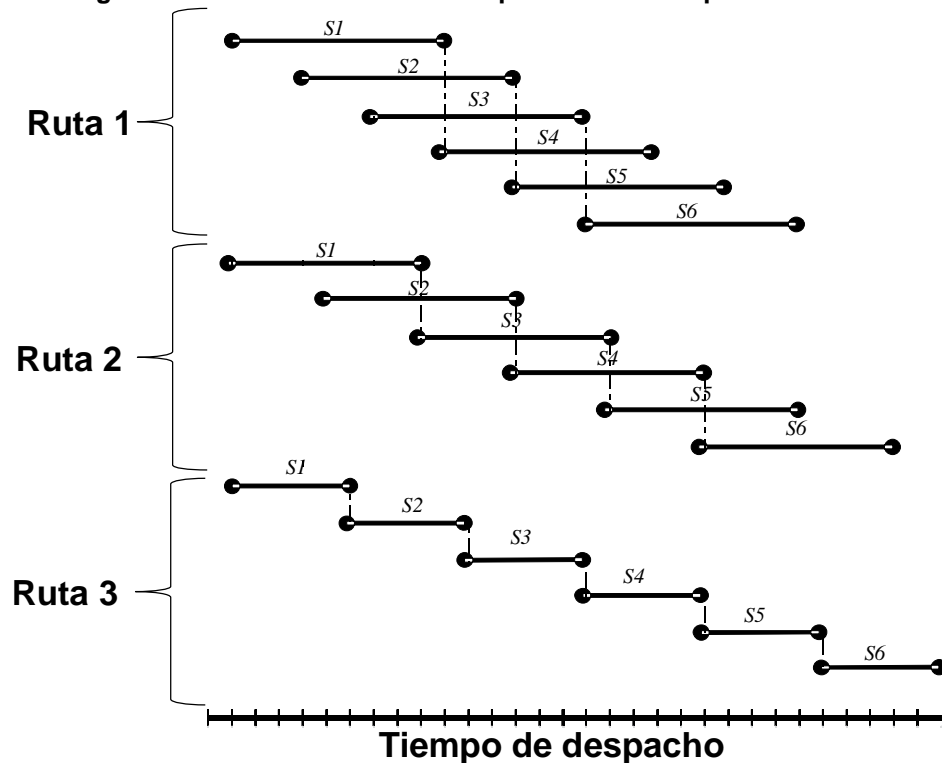
El primer caso facilita la programación de autobuses, dado que el mismo vehículo puede ejecutar de forma secuencial y sin tiempos de inactividad los servicios programados en una misma ruta, es decir, la hora de finalización de los servicios están sincronizados con la hora de inicio de otro de la misma ruta. Esto puede observarse en la

Figura 32, en donde las líneas punteadas al final de cada servicio enlazan en ese mismo momento con el inicio del siguiente servicio que puede ejecutar el mismo autobús en la misma ruta.

Esta estrategia de programación de servicios es la que tradicionalmente se utiliza en el sistema Megabús, lo que indica que se tiene una programación sin costos asociados a los tiempos de inactividad y que garantiza que los autobuses no deban cambiar de ruta ni de terminal durante su operación.

No obstante, la condición de intervalos de paso como divisores exactos del tiempo de ciclo, hace necesario que en los casos en los que esto no se cumpla de forma natural, deban programarse un número de servicios mayor a los requeridos por la demanda generando sobre costos en la operación.

Figura 32. Programación de servicios con tiempo de ciclo múltiplo del intervalo de paso.

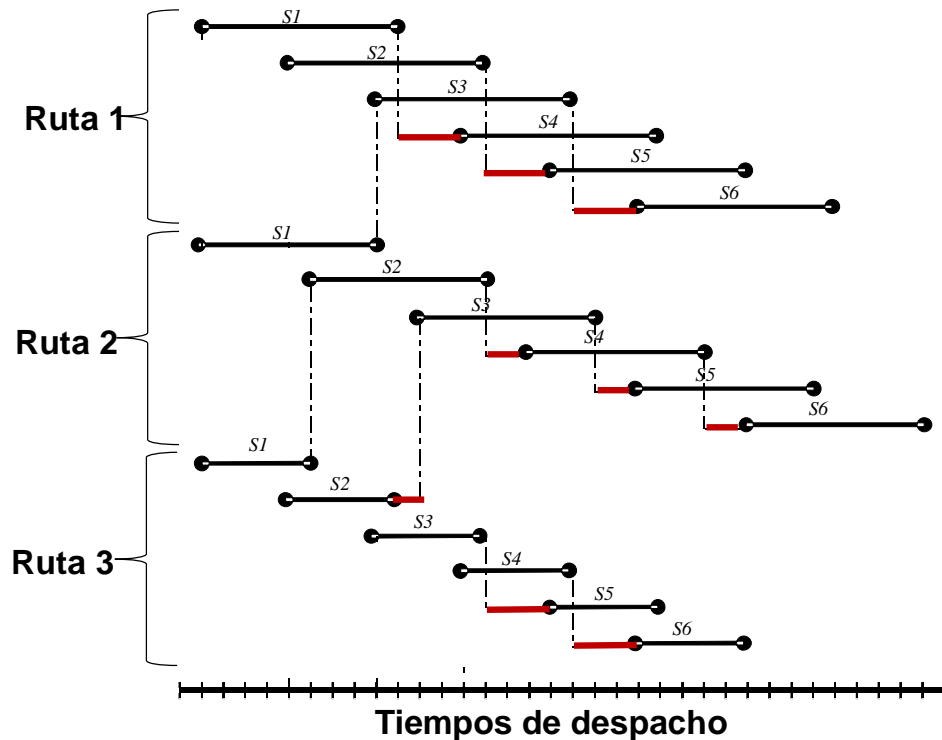


Fuente: Elaboración propia

En el segundo caso, es posible generar una programación de servicios más ajustada a la demanda de usuarios que requieren del servicio, definiendo las horas de los despachos según el intervalo de paso calculado para prestar justo el servicio necesario, sin considerar si es múltiplo o no del tiempo de ciclo. Como consecuencia de eliminar esta restricción, las horas de finalización e inicio de los servicios de la misma ruta generalmente no están sincronizados, generando tiempos muertos entre uno y otro.

Estos tiempos muertos representan costos en la operación, que para ser reducidos es necesario que un autobús pueda cambiar de ruta buscando ejecutar el siguiente servicio más cercano a la hora de finalización del actual. Esto puede observarse en la **Figura 33**, donde las líneas punteadas al final de un servicio, enlazan con el inicio del servicio siguiente que puede ejecutar el mismo autobús, sin embargo, el despacho del siguiente servicio sucede tiempo después de la finalización del primero (las líneas rojas representan los tiempos inoficiosos). También se observa que enlazar el S1 de la Ruta 2 con el S3 de la Ruta 1 permite eliminar (en este caso) el tiempo inoficioso para el bus que los ejecute consecutivamente.

Figura 33. Programación de servicios con tiempo de ciclo que no es múltiplo del intervalo de paso.



Fuente: Elaboración propia

En la operación del sistema Megabús es el Ente Gestor quien realiza la programación de los servicios y autobuses, mientras que los concesionarios de operación se encargan de la programación de los conductores. El Ente Gestor entrega a los concesionarios la programación de servicios en forma de tablas (*una por autobús en operación*) que contienen los servicios que deben ser ejecutados por cada vehículo a lo largo de una jornada de operación.

Las tablas de programación para los autobuses tienen por característica general que todos los servicios que la componen son de la misma ruta y que la finalización de un servicio está sincronizada con el inicio del servicio siguiente. Sin embargo, el tiempo de operación de los autobuses puede ser tan largo como la jornada de operación del sistema (19 horas) o tan corto como sea necesario (2 horas), esta situación se presenta porque se considera el comportamiento típico de la demanda en transporte público, que generalmente presenta unos periodos pico de movilización de usuarios en la mañana y tarde.

Para esto, Megabús S.A. lleva a cabo un procedimiento que se repite para cada ruta y que se basa en el análisis del comportamiento de la demanda de usuarios y en la definición de los intervalos de paso, tiempos de ciclo y flota necesaria. Una vez definidas estas variables, se trabaja sobre una plantilla de Excel que facilita la construcción de la programación de cada ruta, a la vez que se definen los servicios que ejecutará cada autobús.

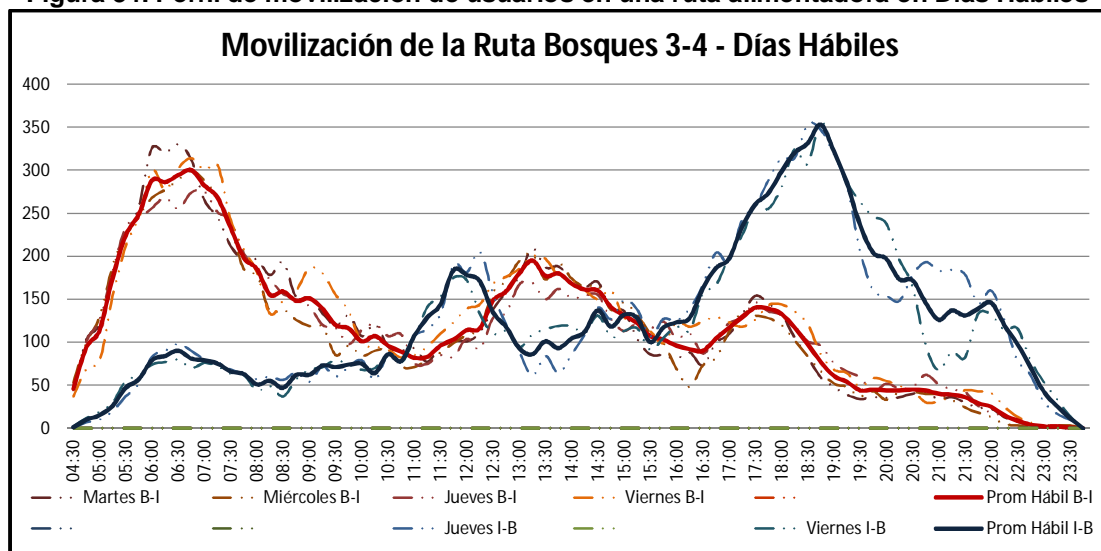
El procedimiento de programación de servicios y autobuses es descrito a continuación, exponiendo sobre cada una de las etapas que lo componen:

Primera Etapa

El análisis del comportamiento de la demanda de usuarios de cada ruta parte de la recopilación y procesamiento de la información. Para cada ruta se toma la información de demanda en el punto de mayor carga (*para el caso de las rutas alimentadoras son los intercambiadores*).

La información de demanda es analizada por cada sentido de viaje de la ruta (*intercambiador-barrio y barrio-intercambiador*), para lo cual se consolida en subperiodos de 15 minutos y analizada con una función de suma móvil que permite identificar los periodos pico en unidades de pasajeros/hora, tal como puede observarse en la **Figura 34**.

Figura 34. Perfil de movilización de usuarios en una ruta alimentadora en Días Hábiles



Fuente. Megabus

Del perfil de movilización de usuarios se identifican los periodos pico y valle en los que se divide la jornada de operación. Para cada periodo se identifica el mayor

volumen de usuarios por sentido y con éste se realiza el cálculo que define la frecuencia de paso y el intervalo de paso.

$$Frecuencia_{Bus/hora} = \frac{Demanda_{Pas/hora}}{Capacidad_{Pas/Bus} * Factor\ de\ ocupación} \quad (51)$$

La frecuencia se interpreta como la cantidad de autobuses necesarios en una hora para garantizar el servicio a la demanda de usuarios en el mismo periodo. La capacidad de los autobuses puede ser afectada por un factor de ocupación (con valores entre 0 y 1) que permite, a criterio del programador, definir el grado de confort que se le ofrece al usuario. A partir de la frecuencia se calcula el intervalo de paso:

$$Intervalo_{Minutos/Bus} = \frac{60_{Minutos/hora}}{Frecuencia_{Bus/hora}} \quad (52)$$

El intervalo de paso se interpreta como los minutos que deben transcurrir entre el paso de un autobús y el siguiente de la misma ruta, para garantizar la frecuencia de paso de forma regular y garantizar un buen servicio a los usuarios. Generalmente, este intervalo de paso es redondeado al valor entero superior.

Segunda Etapa

El tiempo de ciclo de cada ruta es definido por la experiencia del programador. Para esta variable, se considera que cada ruta puede operar a velocidades totalmente diferentes y que están relacionadas con el tipo de vías por las que se define su recorrido, la demanda de usuarios, forma de conducción del operador y otros factores no controlables en sistemas de transporte operados con autobuses.

Actualmente, se define el tiempo de ciclo a través del seguimiento a la operación de cada ruta en campo, sin embargo, podría ser calculado a través del análisis de la información de localización de los vehículos a través de equipos GPS instalados a bordo.

La definición del tiempo de ciclo es un aspecto importante para la calidad del servicio, puesto que si se define menos tiempo del realmente necesario para un recorrido completo, se generan retrasos en la operación de los vehículos por la imposibilidad de cumplir con el parámetro establecido. Cuando el tiempo de ciclo es más largo del que se requiere, se generan ineficiencias en el aprovechamiento de los autobuses y conductores. En ambos casos, las consecuencias llevan a sobrecostos de la operación.

Tercera Etapa

Dado que en los periodos de baja movilización, la definición de la frecuencia de paso a partir del análisis de la demanda, capacidad del autobús y factor de ocupación puede resultar en intervalos de paso inaceptables para los usuarios, se hace necesario realizar un análisis para cada ruta y definir los intervalos máximos permitidos, que impedirán la prestación de un servicio deficiente.

Los intervalos máximos son definidos por el programador para cada ruta y periodo del día. Las consideraciones que se tienen para definir los intervalos máximos permitidos están relacionados con los costos, zona de cobertura, demanda y hora del día. De esta forma, para la selección del intervalo de programación de servicios y autobuses debe ser el resultado de la siguiente fórmula:

$$Intervalo = \min[Intervalo_{Demanda}, Intervalo_{Máximo}] \quad (53)$$

Cuarta Etapa

De acuerdo a los parámetros definidos en las primeras etapas, se analiza la relación entre el tiempo de ciclo y el intervalo de paso, ajustando uno u otro (*generalmente es el intervalo de paso*) hasta lograr que el cociente dé como resultado un valor entero, lo que indica la sincronización de los servicios de tal forma que puedan ser asignados a los autobuses para una ejecución secuencial y sin tiempos de inactividad entre ellos. El resultado de la división entre el tiempo de ciclo y el intervalo de paso determina la flota requerida para cada ruta durante los diferentes periodos de operación.

Quinta Etapa

Una vez superadas las primeras etapas del proceso, se construyen las tablas de programación de servicios y autobuses. A partir de una hora de inicio general del sistema, se definen las horas de despacho en orden cronológico hasta el final de la operación. Esta construcción se basa en los periodos e intervalos definidos. Se usa la siguiente fórmula:

$$Hora\ Despacho_i = Hora\ Despacho_{i-1} + Intervalo_j \quad (54)$$

Que indica que la *Hora Despacho* del servicio i es igual a la *Hora Despacho* del servicio $i - 1$ más el *Intervalo* definido para el periodo j .

A medida que se definen los horarios de salida de los servicios, éstos son asignados a los autobuses que los van a ejecutar, teniendo en cuenta la cantidad de flota calculada para cada periodo de operación. Los autobuses se asignan de forma secuencial a los servicios y no es permitido el adelantamiento o sobrepaso

de los autobuses. En la **Figura 35** se presenta un ejemplo de programación de rutas a la izquierda, y dos de las tablas resultantes en el centro y la derecha.

Figura 35. Ejemplo de programación de rutas (parte izquierda) y dos de las tablas resultantes (centro y derecha)

2500 LOTES HABILES		
tabla	barrio	Inter CUBA
1	04:48	04:58
2	04:58	05:08
1	05:08	05:18
2	05:18	05:28
1	05:28	05:38
3	05:31	05:42
4	05:35	05:47
2	05:39	05:51
5	05:44	05:56
1	05:49	06:01
⋮		
1	07:21	07:33
3	07:25	07:37
4	07:30	07:42
2	07:34	07:46
5	07:39	07:51
1	07:44	07:56
3	07:48	07:59
4	07:52	08:03
2	07:55	08:06
5	08:00	08:11
1	08:07	08:18
4	08:14	08:25
5	08:21	08:32
1	08:28	08:39
⋮		

2500 LOTES HABILES		
tabla	barrio	Inter CUBA
2	04:58	05:08
2	05:18	05:28
2	05:39	05:51
2	06:02	06:14
2	06:25	06:37
2	06:48	07:00
2	07:11	07:23
2	07:34	07:46
2	07:55	08:06
2		17:07
2	17:18	17:29
2	17:41	17:52
2	18:04	18:15
2	18:27	18:38
2	18:50	19:01
2	19:13	19:24
2	19:36	19:47
2	19:59	20:09
2	20:19	

2500 LOTES HABILES		
tabla	barrio	Inter CUBA
4	05:35	05:47
4	05:58	06:10
4	06:21	06:33
4	06:44	06:56
4	07:07	07:19
4	07:30	07:42
4	07:52	08:03
4	08:14	08:25
4	08:35	08:46
4	08:56	09:07
4	09:17	09:28
4	09:38	09:49
⋮		
4	20:03	20:13
4	20:23	20:33
4	20:43	20:53
4	21:03	21:13
4	21:23	21:33
4	21:43	21:53
4	22:03	22:13
4	22:23	22:33
4	22:43	22:53
4	23:03	23:13
4	23:23	23:37
4	23:47	

Fuente. Megabus

7 PLANTEAMIENTO DE LA SOLUCIÓN

Para resolver el problema de programación de autobuses de las rutas alimentadoras del sistema Megabús, se propone formular el problema de forma similar a uno de empaquetamiento en una dimensión y, como técnica de solución, implementar un algoritmo genético, como el presentado en (Chu and Beasley, 1997).

Como ya fue indicado, dentro de los costos considerados para la programación de autobuses, la variable de mayor peso es el tamaño de la flota, con la cual se debe garantizar la ejecución del 100% de los servicios programados. El costo generado en relación con el tamaño de la flota en operación es calculado con la siguiente ecuación.

$$CTF = CUV * NV \quad (55)$$

Dónde:

CTF = Costo por tamaño de flota en operación

CUV = Costo unitario por uso de vehículo

NV = Número de vehículos en operación

Para la programación de un mismo autobús, el tiempo de inactividad que puede presentarse entre el fin de un servicio y el inicio del siguiente, es entendido como tiempo muerto, inoficioso o de inactividad y es un costo a considerar por cuanto representa el uso ineficiente de la flota. Una asignación que permita la acumulación de demasiado tiempo inoficioso de los autobuses, incrementa el requerimiento de autobuses en operación.

Si se considera una flota en operación $K = \{1, 2, 3, \dots, m\}$ y que a cada autobús en operación se le asigna el conjunto de servicios $I^k = \{1, 2, 3, \dots, n\}$, el tiempo inoficioso del bus k se calcula como sigue:

$$T_{inof}^k = \sum_{i=1}^{n-1} H_{ini_{i+1}}^k - H_{fin_i}^k \quad (56)$$

Dónde:

T_{inof}^k = Tiempo inoficioso del bus k

$H_{ini_{i+1}}^k$ = Hora de inicio del servicio $i + 1$ del bus k

$H_{fin_i}^k$ = Hora de fin del servicio i del bus k

El tiempo total de inactividad entre servicios se calcula con la siguiente ecuación:

$$Tinoftotal = \sum_{k=1}^m Tino f_k \quad (57)$$

Respecto a los tiempos de inactividad se hace énfasis en dos condiciones que son tenidas en cuenta:

i) En los casos en que el tiempo de inactividad supere un valor preestablecido, suficiente para el traslado y permanencia mínima del autobús en los patios (sitio de parqueo y alistamiento para la operación), se considerará que este tiempo puede ser aprovechado en actividades propias de mantenimiento y no sumará como costo asociado a la ineficiencia en la operación.

ii) En una solución factible no se presentan diferencias negativas entre dos servicios consecutivos asignados a un mismo autobús, puesto que se tiene como restricción que:

$$Hini_{i+1}^k - Hfin_i^k \geq 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, n - 1 \quad (58)$$

Por último, si bien es deseable mantener la operación de un autobús en una misma ruta, definir esto como una restricción “dura” incrementaría los tiempos de inactividad. Por esta razón, en este modelo se permite el cambio de ruta en la operación de autobuses, sin embargo, se considera una penalización por cada caso en que ocurra, procurando reducir la frecuencia con que se presente esta situación (*restricción blanda*).

Para el caso de Megabús, se pueden presentar dos tipos de cambios de ruta. En uno de ellos, las rutas entre las cuales se cambia la operación de un autobús tienen operación en el mismo terminal (todas las rutas se definen entre un terminal y un punto extremo en barrio). En un segundo caso, las rutas entre las cuales se cambia la operación de un autobús tienen operación en terminales diferentes, por lo que se hace necesario considerar que se cumpla lo siguiente:

$$Hini_{i+1}^k - Hfin_i^k \geq Tviaje_{AB} \quad (59)$$

Dónde:

$Hini_{i+1}^k$ = Hora de inicio del servicio $i + 1$ del bus k

$Hfin_i^k$ = Hora de fin del servicio i del bus k

$Tviaje_{AB}$ = Tiempo de viaje entre terminales A y B

El tiempo de desplazamiento de un autobús entre dos terminales, es necesariamente el tiempo de desplazamiento del autobús en vacío, puesto que el sistema no tiene ninguna ruta alimentadora que conecte dos terminales.

Para el caso de cambio de rutas con operación en diferentes terminales, el costo de penalización por esta situación debe incluir el costo del desplazamiento del autobús entre los terminales.

La función objetivo a evaluar considera los tres costos planteados en este capítulo, siendo de mayor peso el costo asociado a la flota en operación, puesto que es el relacionado con la necesidad de compra de autobuses y por ende con la inversión de los transportadores.

7.1 TÉCNICA DE EMPAQUETAMIENTO

El problema de empaquetamiento es encontrado en diversos campos de la industria, transporte de carga, edición de periódicos y otros más (Zhang et al., 2006). En cada caso se busca “acomodar” de manera óptima una serie de elementos pequeños en un área de mayor tamaño, como puede ser una serie de rectángulos de diferentes tamaños que deben ser recortados de una hoja de madera minimizando el desperdicio de material, los artículos y espacios publicitarios en una hoja de una revista o periódico, acomodar elementos rectangulares de distintos tamaños en una bodega o container, entre otros.

La solución para el problema de empaquetamiento en dos dimensiones considera técnicas heurísticas o exactas, como las presentadas por (Zhang et al., 2006) y (Martello and Monaci, 2015). En el caso de aplicación para la programación de autobuses, se tratarán los servicios programados para cada ruta como rectángulos de igual altura y diferente ancho, restándole una dimensión al problema original.

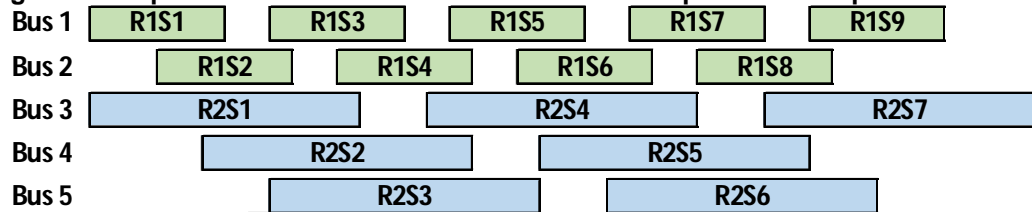
A manera de ejemplo, en la **Figura 36**, se representan los servicios de dos rutas. El ancho de cada rectángulo representa el tiempo de ciclo de la ruta para la cual fue programado el servicio y los espacios entre los rectángulos representan tiempos de inactividad, que para el caso de esta solución suman 26 unidades de tiempo. La asignación de estos servicios a los autobuses que los ejecutan se hizo de tal manera que no se efectúan cambios de ruta durante la operación.

La secuencia de empaquetamiento corresponde a un vector con dimensión igual a la cantidad de servicios programados, para los que se busca asignar la flota, de tal forma que cada servicio sea ejecutado por un único autobús y ninguno debe quedar sin asignación. Para el caso de ejemplo, los servicios de ambas rutas son identificados como se presenta en la **Figura 37**.

Para la asignación de los servicios a los autobuses, el algoritmo de empaquetamiento considera la restricción de traslapo en los servicios, es decir, para todos los servicios asignados a un mismo autobús se cumple que el tiempo de finalización de un servicio es menor o igual a la hora de inicio del siguiente servicio a ejecutar. De esta manera, es en la lógica de programación del algoritmo

de empaquetamiento donde se garantiza una solución factible, en el sentido de que los servicios asignados a un mismo autobús en ningún caso estarán traslapados o superpuestos.

Figura 36. Representación de servicios con autobuses operando siempre en la misma.



Fuente: Elaboración propia

Figura 37. Identificación de los servicios de las rutas del caso de ejemplo (vector solución)

R1S1	R1S2	R1S3	R1S4	R1S5	R1S6	R1S7	R1S8	R1S9	R2S1	R2S2	R2S3	R2S4	R2S5	R2S6	R2S7
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

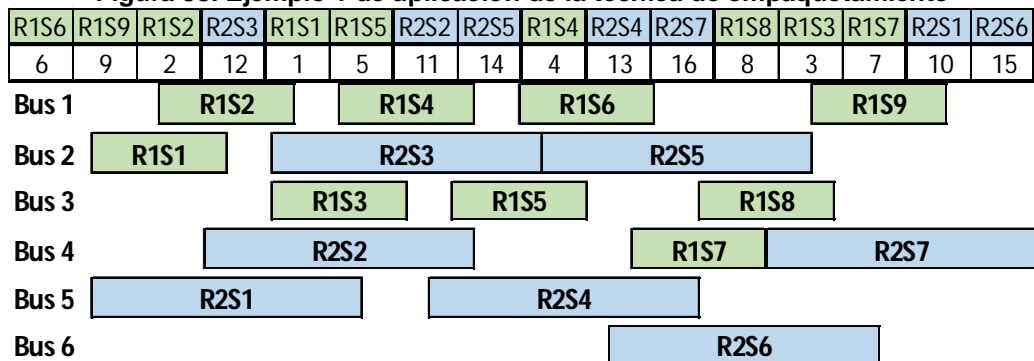
Fuente: Elaboración propia

El algoritmo recorre ordenadamente (de izquierda a derecha) el vector de solución, utilizando un índice i . Para cada servicio en la posición i se verifica cual autobús tiene capacidad para realizarlo. Esta verificación se hace jerárquicamente desde el bus 1 hasta el bus n (de arriba hacia abajo), para asignar el servicio se asigna al primer autobús que lo pueda realizar.

Las

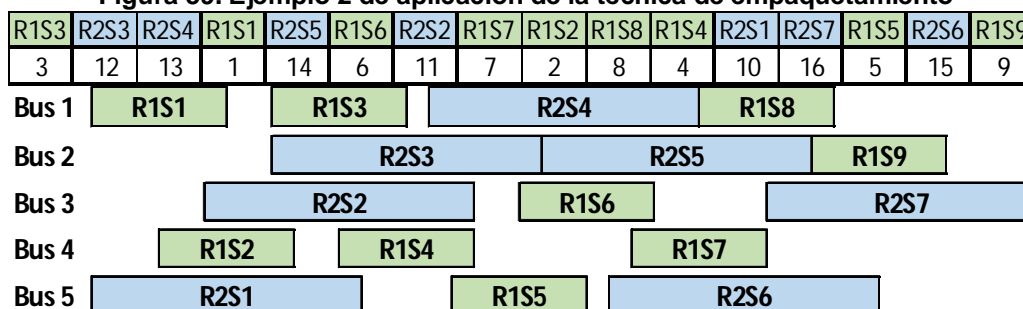
Figura 38 y Figura 39, presentan dos soluciones resultantes de la aplicación de la técnica de empaquetamiento a la asignación de autobuses. En el primer caso se requieren seis autobuses y se tiene un tiempo muerto o inoficioso de 30 unidades. En el segundo caso se consiguió una mejor solución que requirió de cinco autobuses y tuvo un tiempo muerto o inoficioso de 24 unidades.

Figura 38. Ejemplo 1 de aplicación de la técnica de empaquetamiento



Fuente: Elaboración propia

Figura 39. Ejemplo 2 de aplicación de la técnica de empaquetamiento



Fuente: Elaboración propia

7.2 ALGORITMO GENÉTICO

Considerando que el problema de programación de autobuses es representado como uno de programación no lineal entera mixta con explosión combinatorial para su solución, tal como se muestra en (Chen and Cherng, 2000), una técnica de solución apropiada son los llamados Algoritmos Genéticos. En este artículo, es implementada una versión modificada del básico Algoritmo Genético, conocida como *Chu-Beasley Genetic Algorithm* (CBGA) (Chu and Beasley, 1997). Esta versión del AG ha sido efectiva para solucionar problemas de gran complejidad y tamaño. Su principal característica consiste en mantener el tamaño de la población constante a través del proceso iterativo. Además, el CBGA garantiza la diversidad de todos los individuos (cromosomas), usando un proceso de sustitución, en el cual solamente un individuo es reemplazado en cada ciclo generacional, bajo las premisas de factibilidad y optimalidad establecidas.

Tal como lo hace el básico Algoritmo Genético, el CBGA usa los operadores de selección, recombinación y mutación a los que se les han introducido sutiles variaciones en la ejecución, especialmente al incluir una función que retorna el grado de infactibilidad de un vector solución (cromosoma) que es considerado en la función objetivo.

Codificación

La codificación muestra cómo una posible solución es representada a través de un cromosoma. Esto constituye el aspecto principal de cualquier Algoritmo Genético, puesto que facilita o dificulta la implementación de los operadores ya mencionados. En este caso, la codificación adoptada para cualquier alternativa de solución X , se representa tal como se observa en la **Figura 37** y una solución vecina de X , definida como X' , es generada intercambiando los servicios de dos posiciones del vector, que son escogidas aleatoriamente.

Algoritmo genético

En el algoritmo genético propuesto por (Chu and Beasley, 1997) se ejecutan los siguientes pasos:

- Generación de una población inicial: En este trabajo de grado se define una población aleatoria, garantizando que no hayan cromosomas repetidos. Sin embargo, la población inicial también podría ser generada con una técnica heurística.
- Selección: Se escogen dos padres usando la técnica de selección por torneo. Cada configuración es evaluada considerando dos aspectos: i) el valor de la función objetivo y ii) el grado de infactibilidad. Esta última consiste en una función que retorna valores positivos proporcionales a la violación de las restricciones y cero cuando la configuración es factible.
- Recombinación: Los padres seleccionados intercambian información, creando dos descendientes. En un Algoritmo Genético convencional ambos descendientes podrían ser parte de la próxima generación de individuos; sin embargo, en el CBGA uno de los descendientes es seleccionado aleatoriamente para sustituir un individuo de la población actual.
- Mutación: En este caso, una posición del cromosoma es seleccionado aleatoriamente con una probabilidad preestablecida para ser alterada. La mutación es implementada para crear una solución vecina.
- Sustitución de población: En el CBGA solo se puede sustituir un individuo de la población actual por la solución obtenida en los pasos anteriores. En el proceso de sustitución no son permitidas soluciones repetidas. Esta filosofía garantiza diversidad y evita una prematura convergencia hacia un óptimo local. Además, al final del proceso de optimización, todos los individuos de la población serán de alta calidad. En consecuencia, el CBGA tiene la capacidad de proceder múltiples soluciones cercanas al óptimo. Se consideran los siguientes pasos:
 - Si el descendiente es infactible, pero con menor grado de infactibilidad que al menos uno de los individuos de la población actual, entonces sustituye al individuo con mayor grado de infactibilidad de la población.
 - Si el descendiente es factible, y existe al menos un individuo infactible en la población, entonces sustituye al individuo con mayor grado de infactibilidad de ésta.
 - Si el descendiente es factible, y todos los individuos en la población actual son factibles, entonces el descendiente sustituye al peor individuo de la población si es mejor y diferente de este.

El proceso se detiene si la incumbente (la mejor solución encontrada en el proceso) no mejora después de un número predeterminado de generaciones, o cuando ya se han realizado el número máximo de ciclos generacionales.

8 RESULTADOS

Como ya fue mencionado, la programación de servicios que actualmente se realiza en el proceso de planeación de la operación de las rutas alimentadoras del sistema Megabús, satisface la condición de definir intervalos de paso que son divisores exactos del tiempo de ciclo, permitiendo que a la vez se defina la programación de autobuses sin que se presenten tiempos inoficiosos ni cambios de ruta para ningún autobús. También se aclaró que esta restricción encarece la operación por la necesidad de programar más servicios de los necesarios.

Para la evaluación de los resultados se seleccionó la operación de 9 rutas de la cuenca Dosquebradas², para las cuales se genera una programación basada únicamente en los intervalos de paso y tiempos de ciclo adecuados para la ruta, sin tener en consideración que el cociente de éstas dos variables deba ser un valor entero. De igual forma, se cuenta con la programación hecha para las mismas 9 rutas con el procedimiento actual.

8.1 COSTOS DE OPERACIÓN ACTUAL

El costo de la operación actual considera únicamente la flota utilizada y los kilómetros programados para la operación de un día, dado que no se tienen tiempos de inactividad entre los servicios. Sin embargo, en las tareas de programación de servicios y autobuses actual, no se considera un análisis que involucre los costos operacionales para su definición, razón por la cual no se cuenta con valores oficiales usados para el cálculo.

Por esta razón, para realizar el análisis comparativo entre los resultados de la solución actual y la propuesta en el presente trabajo de grado, se estiman estos costos en unidades que permitan la comparación de ambos escenarios. De esta forma, el costo unitario por el uso de un autobús durante un día se estima en \$35.000,00³ y el costo por cada kilómetro programado en \$1.790,00⁴. La **Tabla 23** presenta el costo de la operación actual de 9 rutas alimentadoras de la cuenca Dosquebradas del sistema Megabús.

El costo relacionado con los kilómetros recorridos es definido en la etapa de programación de servicios, por lo que resulta ser un costo fijo para la programación de autobuses. Es así como, al definir los intervalos y tiempos de

² No se consideró en la prueba la ruta Boquerón por operar únicamente en horarios especiales y no de forma continua como las 9 restantes.

³ Pesos colombianos. Valor aproximado a partir del costo de un autobús del tipo alimentador, considerando una vida útil de 12 años de operación.

⁴ Pesos colombianos. Empresas de transporte urbano de Pereira, en febrero de 2015 informaron a Megabús sobre un costo por kilómetro de \$1788,61, que fue aproximado a \$1790 para esta evaluación.

ciclo sin la restricción que los relaciona es posible reducir la cantidad de servicios programados, obteniendo una programación más consecuente con la demanda. En la **Tabla 24** se presenta la comparación de la cantidad de kilómetros programados en cada caso, dejando notar la reducción que permite esta flexibilidad en este costo.

Tabla 23. Costo de la operación actual

Operación Actual						
N°	Ruta	Km Día Hábil	Costo por Km recorridos	Flota	Costo por uso de flota	Costo Total de la Operación
4	Camilo Torres	704,34	\$ 1.260.768,60	3	\$ 105.000,00	\$ 1.365.768,60
5	Pablo VI	337,2	\$ 603.588,00	1,5	\$ 52.500,00	\$ 656.088,00
6	Bombay	754,28	\$ 1.350.161,20	3	\$ 105.000,00	\$ 1.455.161,20
7	Calle 52	404,4	\$ 723.876,00	1,5	\$ 52.500,00	\$ 776.376,00
8	La Mariana	840,58	\$ 1.504.638,20	4	\$ 140.000,00	\$ 1.644.638,20
9	Pinos 1	1344,13	\$ 2.405.992,70	5	\$ 175.000,00	\$ 2.580.992,70
10	Bosques 3-4	1650,25	\$ 2.953.947,50	6	\$ 210.000,00	\$ 3.163.947,50
11	San Diego	583,44	\$ 1.044.357,60	2	\$ 70.000,00	\$ 1.114.357,60
13	Cerro Azul	523,02	\$ 936.205,80	2	\$ 70.000,00	\$ 1.006.205,80
TOTALES		7141,64	\$ 12.783.535,60	28	\$ 980.000,00	\$ 13.763.535,60

Fuente: Elaboración propia con información de Km Día Hábil y flota suministrada por Megabús S.A.

Tabla 24. Comparación costos por kilómetro programado entre programación de servicios actual vs propuesta

N°	Ruta	Programación actual		Programación Propuesta	
		Km Día Hábil	Costo por Km recorridos	Km Día Hábil	Costo por Km recorridos
4	Camilo Torres	704,34	\$ 1.260.768,60	630,7	\$ 1.128.953,00
5	Pablo VI	337,2	\$ 603.588,00	245,7	\$ 439.803,00
6	Bombay	754,28	\$ 1.350.161,20	782,73	\$ 1.401.086,70
7	Calle 52	404,4	\$ 723.876,00	290,29	\$ 519.619,10
8	La Mariana	840,58	\$ 1.504.638,20	754,02	\$ 1.349.695,80
9	Pinos 1	1344,13	\$ 2.405.992,70	1299,65	\$ 2.326.373,50
10	Bosques 3-4	1650,25	\$ 2.953.947,50	1383,05	\$ 2.475.659,50
11	San Diego	583,44	\$ 1.044.357,60	504,14	\$ 902.410,60
13	Cerro Azul	523,02	\$ 936.205,80	440,3	\$ 788.137,00
TOTALES		7141,64	\$ 12.783.535,60	6330,58	\$ 11.331.738,20

Fuente: Elaboración propia.

8.2 COSTOS DE OPERACIÓN PROPUESTA

Siendo claro que esta metodología de programación de servicios permite reducir el costo por kilómetros programados, también se ha mostrado que inevitablemente

surgen tiempos en los que un autobús permanecerá inoficioso entre la finalización de un servicio y el comienzo del siguiente de su programación.

El costo por el tiempo inoficioso debe considerar tres costos relacionados con la operación de un autobús: i) el costo asociado al uso del autobús, ii) el costo asociado al operador que conduce el autobús y iii) el costo asociado al consumo de combustible y desgaste del autobús en ralentí. De esta forma, el costo del tiempo inoficioso de un autobús se estima en \$200,00 por minuto⁵.

Finalmente, aunque no representa un costo para la operación, es preferible reducir el número de veces que un autobús cambia de ruta durante su operación, para lo cual se considera una penalización sobre esta variable.

8.3 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

La programación de servicios que sirvió de base para realizar la programación de autobuses con la metodología propuesta, corresponde a la comparada con la programación actual en la **Tabla 24**. En este sentido, la reducción de los costos por kilómetros programados son constantes y menores con la propuesta presentada, sin embargo, se quiso comprobar que la reducción en los costos de la operación no sólo corresponden a este aspecto, sino que también el costo general de la operación es menor considerando también los costos por la cantidad de vehículos en operación y por los tiempos de inactividad.

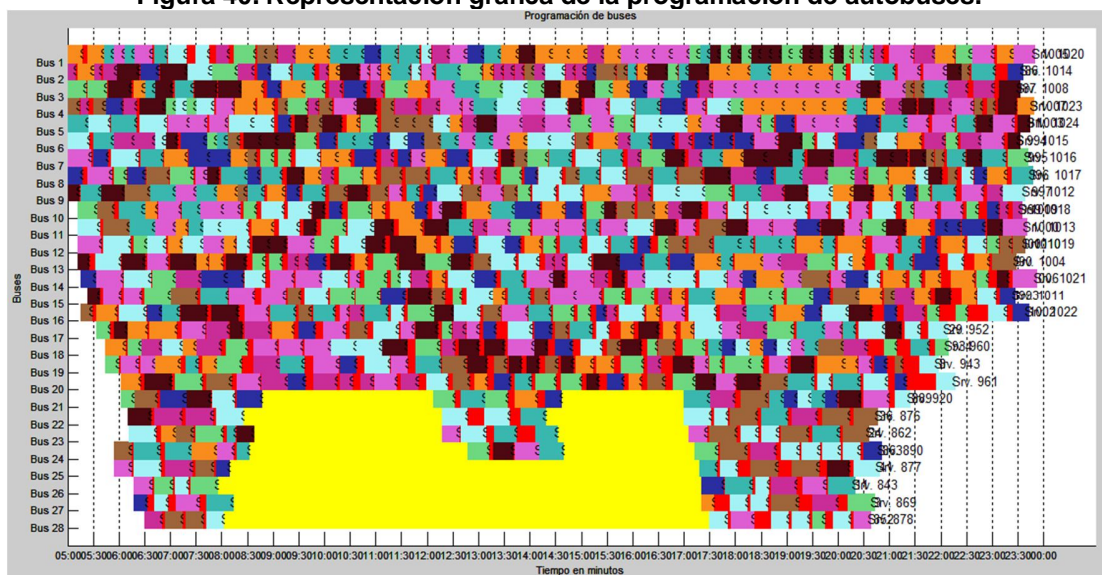
La programación de autobuses resultante de esta propuesta puede representarse gráficamente como en la **Figura 40**, donde el eje vertical representa los autobuses requeridos para la operación y el horizontal su tiempo de operación durante una jornada. Se observa claramente como la técnica de empaquetamiento consigue perfectamente su objetivo de asignar a los primeros buses una programación continua durante toda la jornada, mientras que los últimos vehículos únicamente son programados para las horas pico de acuerdo a la programación de servicios, que a su vez responde a la demanda de usuarios.

De la solución presentada en la **Figura 40** se interpreta que la programación de 9 rutas alimentadoras de la cuenca de Dosquebradas será ejecutada con 28 autobuses, de los cuales 20 tienen operación continua durante casi toda la jornada, 4 en tres periodos pico de mañana, medio día y tarde, y 4 en dos periodos. Los diferentes colores en la programación de cada autobús representan el tiempo inoficioso (color rojo), el tiempo de inactividad para ir a patios (color

⁵ Pesos colombianos. Valor aproximado considerando el costo por uso de un autobús durante un día, el salario mensual de un conductor más prestaciones y el costo por consumo de combustible de un vehículo en ralentí, todos llevados a pesos por minuto.

amarillo) y la ruta a la que pertenece el servicio que ejecuta (un color distinto para cada ruta).

Figura 40. Representación gráfica de la programación de autobuses.



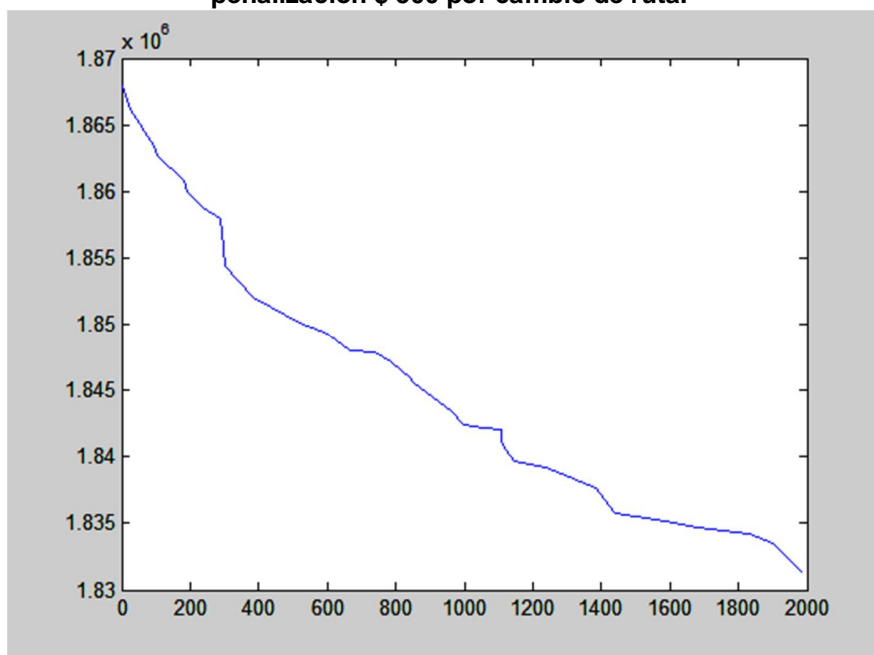
Fuente: Elaboración propia.

En la

Figura 41 se presenta como evoluciona el Algoritmo Genético en la búsqueda de buenas soluciones, para la programación de autobuses. Se observa que se parte de una solución costosa, que es el mejor individuo de una población inicial construida aleatoriamente, y que a medida que se ejecutan las iteraciones se obtiene mejoría en la función objetivo.

El caso presentado corresponde a una prueba para la operación de las rutas tomadas como caso de estudio, asumiendo una penalización de \$500 sobre la variable de cambio de ruta de un autobús. En este, como en todos los ensayos, el costo general de la operación fue menor que el costo actual.

Figura 41. Evolución del AG para programación de autobuses en una de las pruebas con penalización \$ 500 por cambio de ruta.



Fuente: Elaboración propia.

8.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Si bien todos los ensayos arrojaron costos operacionales menores a los de la operación actual, la restricción blanda frente al cambio de ruta permitió analizar la variación de los resultados frente a esta condición. En las **Tabla 25** a **Tabla 28** se presentan los resultados de diferentes escenarios en los que se determinaban valores de \$500, \$1000, \$2000 y \$4000 como penalización sobre la variable de cambio de ruta.

Tabla 25. Resultados obtenidos con una penalización de \$500,00 para cambio de ruta de un autobús

Penalización por cambio de ruta \$500					
	Buses	Tiempo inoficioso	N° de cambios de ruta	Penalización por cambio de ruta	Costo Total operación
Prueba 1	28	2550	683	\$ 341.500,00	\$ 12.821.738,20
Prueba 2	28	2496	682	\$ 341.000,00	\$ 12.810.938,20
Prueba 3	28	2518	685	\$ 342.500,00	\$ 12.815.338,20
Prueba 4	28	2539	697	\$ 348.500,00	\$ 12.819.538,20
Prueba 5	28	2556	680	\$ 340.000,00	\$ 12.822.938,20

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26. Resultados obtenidos con una penalización de \$1000,00 para cambio de ruta de un autobús

	Penalización por cambio de ruta \$1000				
	Buses	Tiempo inoficioso	N° de cambios de ruta	Penalización por cambio de ruta	Costo Total operación
Prueba 1	28	2610	672	\$ 672.000,00	\$ 12.833.738,20
Prueba 2	28	2564	670	\$ 670.000,00	\$ 12.824.538,20
Prueba 3	28	2572	700	\$ 700.000,00	\$ 12.826.138,20
Prueba 4	28	2908	548	\$ 548.000,00	\$ 12.893.338,20
Prueba 5	28	2560	673	\$ 673.000,00	\$ 12.823.738,20

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27. Resultados obtenidos con una penalización de \$2000,00 para cambio de ruta de un autobús

	Penalización por cambio de ruta \$2000				
	Buses	Tiempo inoficioso	N° de cambios de ruta	Penalización por cambio de ruta	Costo Total operación
Prueba 1	28	2613	687	\$ 1.374.000,00	\$ 12.834.338,20
Prueba 2	28	2700	655	\$ 1.310.000,00	\$ 12.851.738,20
Prueba 3	28	2982	543	\$ 1.086.000,00	\$ 12.908.138,20
Prueba 4	29	2923	570	\$ 1.140.000,00	\$ 12.931.338,20
Prueba 5	28	2796	597	\$ 1.194.000,00	\$ 12.870.938,20

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28. Resultados obtenidos con una penalización de \$4000,00 para cambio de ruta de un autobús

	Penalización por cambio de ruta \$4000				
	Buses	Tiempo inoficioso	N° de cambios de ruta	Penalización por cambio de ruta	Costo Total operación
Prueba 1	28	2959	574	\$ 1.148.000,00	\$ 12.903.538,20
Prueba 2	29	3167	613	\$ 1.226.000,00	\$ 12.980.138,20
Prueba 3	29	3315	539	\$ 1.078.000,00	\$ 13.009.738,20
Prueba 4	29	3233	466	\$ 932.000,00	\$ 12.993.338,20
Prueba 5	29	3070	575	\$ 1.150.000,00	\$ 12.960.738,20

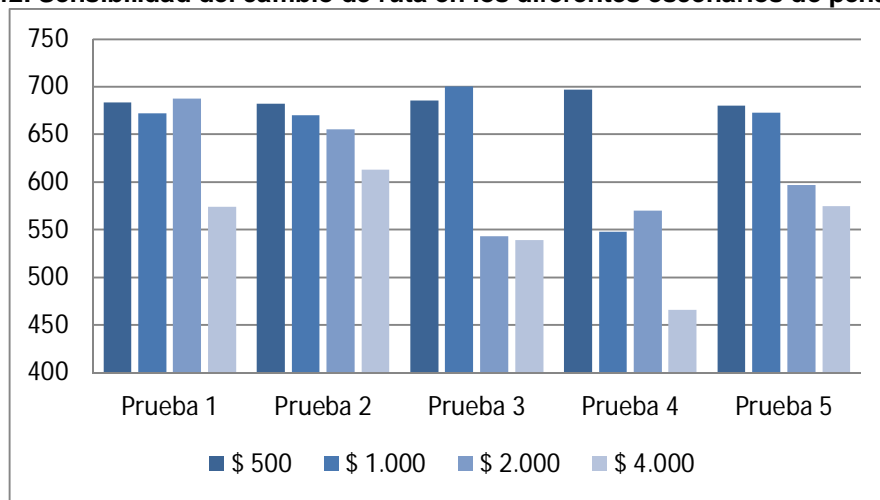
Fuente: Elaboración propia.

En cada tabla se presentan la cantidad de autobuses programados, los minutos de inactividad y cantidad de veces que los autobuses cambian de ruta. Respecto a la penalización por cambio de ruta, ésta se presenta independiente y no es considerada como costo de la operación, dado que por sí misma no impacta en el uso de los recursos, es decir, con o sin cambio de ruta tanto el autobús como el conductor están en operación.

De otra parte, las **Figura 42** a **Figura 44** presentan la comparación de los resultados en cada escenario para las variables de cambio de ruta, tiempo inoficioso y costo de la operación⁶.

La **Figura 42** permite observar que la cantidad de cambios de ruta durante la operación se reducen a medida que incrementa la penalización, lo que resulta ser un resultado lógico de la propuesta.

Figura 42. Sensibilidad del cambio de ruta en los diferentes escenarios de penalización.



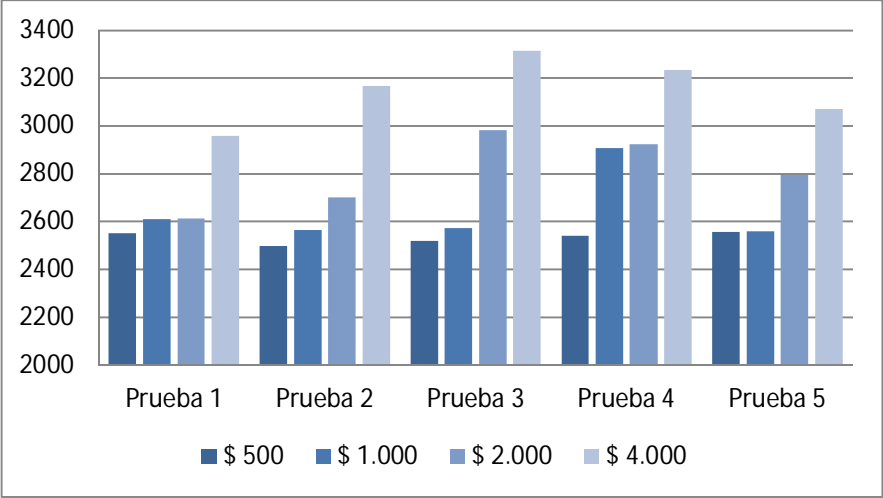
Fuente: Elaboración propia.

En las

⁶ El costo de la operación considera el costo por tiempo inoficioso, el costo por uso de vehículos y el costo por los kilómetros programados, que resulta ser fijo en todos los casos por ser el insumo para la programación de autobuses. El costo de la operación no incluye la penalización por cambios de ruta, por cuanto no representa un costo real.

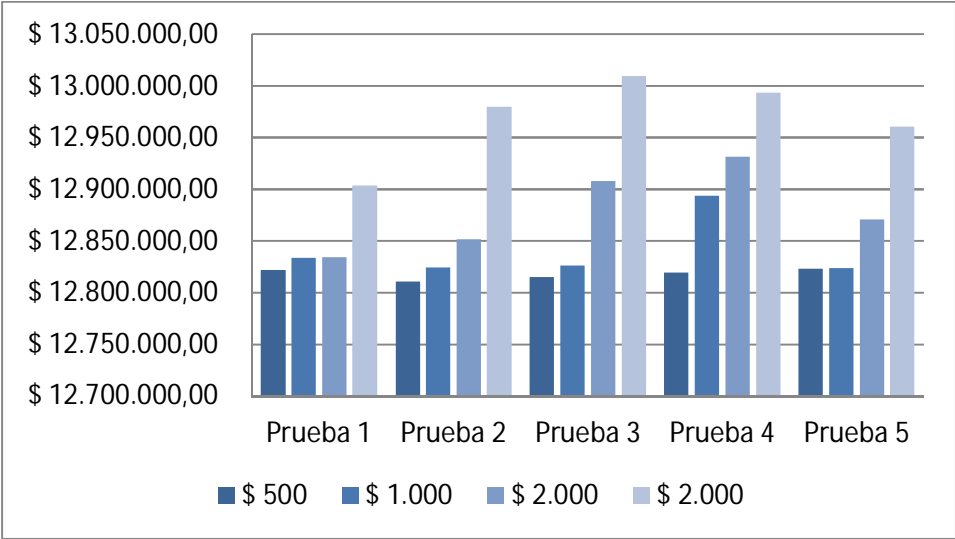
Figura 43 y **Figura 44** se hace notorio que a medida que se restringe la posibilidad de cambiar de ruta, se incrementan los minutos de tiempo inoficioso y el costo total de la operación y el costo total de la operación. En cuanto a la sensibilidad del tamaño de la flota frente al cambio de ruta, para el caso del ejemplo se mantiene en 28 autobuses para los escenarios de penalización de \$500, \$1000 y \$2000, sólo hasta una penalización de \$4000 se incrementa la flota a 29 autobuses en 3 de las 5 pruebas realizadas.

Figura 43. Sensibilidad del tiempo inoficioso en los diferentes escenarios de penalización.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 44. Sensibilidad del costo de la operación en los diferentes escenarios de penalización



Fuente: Elaboración propia.

9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El método de solución propuesto a través del uso de la técnica de empaquetamiento y la búsqueda de buenas soluciones con un Algoritmo Genético, logra encontrar soluciones que reducen los costos operacionales actuales.

La estrategia de suprimir la restricción de que los intervalos de paso sean divisores exactos de los tiempos de ciclo de las rutas, puede generar ahorros en las variables de kilómetros programados y cantidad de autobuses requerida en operación, pero inevitablemente surge el costo del tiempo inoficioso, que aunque no tiene tanto peso como los otros, tiene impacto en el costo total de la operación.

En todas las pruebas, la suma de costos de la operación resulta inferior al costo actual, logrando mantener o incluso reducir la flota necesaria para la programación de las rutas, resultando más eficiente asumir en alguna medida el costo por detener un autobús unos minutos, que mantener frecuencias elevadas para garantizar tiempos de ciclo e intervalos de paso compatibles.

La variable de penalización por cambio de rutas, resulta un factor que incide en los costos totales. Al facilitar o no el empaquetamiento de los servicios de diferentes rutas, reduce o incrementa el costo por tiempos inoficiosos durante la operación.

Esta propuesta es parte de un proceso de planeación de operación y como tal depende de la eficiencia en la programación de servicios, y a la vez incide en la eficiencia de la programación de conductores. De la etapa previa se requiere una programación que prevea y mitigue las contingencias que puedan retrasar la operación, para garantizar una programación de autobuses con alta probabilidad de implementarse en la realidad.

En estudios posteriores, podría considerarse como técnica de flexibilización de restricciones y oportunidad de mejorar los resultados, el permitir cambiar en pocos minutos la programación de algunos servicios de rutas definidos en la etapa anterior. Esto permitiría integrar una variable de evaluación adicional que ofrecería la oportunidad de encajar o empaquetar de forma más precisa los servicios, siendo posible reducir aún más los requerimientos de flota.

10 BIBLIOGRAFÍA

- Baita, F., Pesenti, R., Ukovich, W., and Favaretto, D. (2000). A comparison of different solution approaches to the vehicle scheduling problem in a practical case. *Comput. Oper. Res.* 27, 1249–1269.
- Ceder, A. (2007). *Public transit planning and operation: theory, modelling and practice* (Burlington, MA: Elsevier Butterworth-Heinemann).
- Ceder, A. (2011a). Optimal Multi-Vehicle Type Transit Timetabling and Vehicle Scheduling. *Procedia - Soc. Behav. Sci.* 20, 19–30.
- Ceder, A. (Avi) (2011b). Public-transport vehicle scheduling with multi vehicle type. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 19, 485–497.
- Chen, T.-H., and Cherng, J.-T. (2000). Optimal phase arrangement of distribution transformers connected to a primary feeder for system unbalance improvement and loss reduction using a genetic algorithm. *IEEE Trans. Power Syst.* 15, 994–1000.
- Chu, P.C., and Beasley, J.E. (1997). A genetic algorithm for the generalised assignment problem. *Comput. Oper. Res.* 24, 17–23.
- Eliyi, D.T., Ornek, A., and Karakütük, S.S. (2009). A vehicle scheduling problem with fixed trips and time limitations. *Int. J. Prod. Econ.* 117, 150–161.
- Guihaire, V., and Hao, J.-K. (2010). Transit network timetabling and vehicle assignment for regulating authorities. *Comput. Ind. Eng.* 59, 16–23.
- Hadjar, A., and Soumis, F. (2009). Dynamic window reduction for the multiple depot vehicle scheduling problem with time windows. *Comput. Oper. Res.* 36, 2160–2172.
- Ibarra-Rojas, O.J., Giesen, R., and Rios-Solis, Y.A. (2014). An integrated approach for timetabling and vehicle scheduling problems to analyze the trade-off between level of service and operating costs of transit networks. *Transp. Res. Part B Methodol.* 70, 35–46.
- Laporte, G., Mesa, J.A., and Ortega, F.A. (2000). Optimization methods for the planning of rapid transit systems. *Eur. J. Oper. Res.* 122, 1–10.
- Laurent, B., and Hao, J.-K. (2009). Iterated local search for the multiple depot vehicle scheduling problem. *Comput. Ind. Eng.* 57, 277–286.

Martello, S., and Monaci, M. (2015). Models and algorithms for packing rectangles into the smallest square. *Comput. Oper. Res.* 63, 161–171.

Naumann, M., Suhl, L., and Kramkowski, S. (2011). A stochastic programming approach for robust vehicle scheduling in public bus transport. *Procedia - Soc. Behav. Sci.* 20, 826–835.

Rodrigues, M.M., de Souza, C.C., and Moura, A.V. (2006). Vehicle and crew scheduling for urban bus lines. *Eur. J. Oper. Res.* 170, 844–862.

Zhang, D., Kang, Y., and Deng, A. (2006). A new heuristic recursive algorithm for the strip rectangular packing problem. *Comput. Oper. Res.* 33, 2209–2217.

Zhoucong, X., Peijia, H., Jing, T., and Liping, L. (2013). Transit Vehicles Intelligent Scheduling Optimization Based on the Division of Characteristic Periods. *Procedia - Soc. Behav. Sci.* 96, 1502–1512.